



BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ

MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
ELEKTRİK ELEKTORNİK MÜHENDİSLİĞİ
BİTİRME PROJESİ RAPORU

YÜK DEĞİŞİMİNE GÖRE ADAPTİF HIZ KONTROLLÜ TAM
OTOMATİK ÇİM BİÇME MAKİNESİ

Berin Işık AKTAŞ - 22294330

Meriç Tunca SALI - 22196625

Ozan VAROL - 22197181

Bölümü: Elektrik Elektronik Mühendisliği	
Proje Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Gülşah Demirhan AYDIN Dr. Öğr. Üyesi Deniz KARAÇOR	
Ders Kodu ve Adı: EEM493, BİTİRME PROJESİ I	
Proje Başlangıcı: 2025-2026 Güz	Proje Süresi (Yarıyıl): 2
Rapor Sunumu: 2025-2026 Haziran	

HAZİRAN, 2026
ANKARA

BİTİRME PROJESİ ONAY FORMU

Berin Işık Aktaş, Ozan Varol, Meriç Tunca Sali tarafından Dr. Öğr. Üyesi Gülşah Demirhan Aydın ve Dr. Öğr. Üyesi Deniz Karaçor yönetiminde hazırlanan Yük Değişiminde Adaptif Hız Kontrolü başlıklı bitirme projesi raporu kapsam ve niteliği açısından tarafımızdan incelenmiş ve kabul edilmiştir.

	Unvan-İsim Soyisim	İmza
DANIŞMAN	Dr. Öğr. Üyesi Gülşah Demirhan Aydın Dr. Öğr. Üyesi Deniz Karaçor	
JÜRİ ÜYESİ	Prof. Dr. Sedat Nazlıbilek	
JÜRİ ÜYESİ	Prof. Dr. Güngör Bal	
JÜRİ ÜYESİ	Öğr. Gör. Dr. Hande Bakiler	

TEŐEKKÜR

Çalıőmalarımız boyunca bizden desteğini esirgemeyen ve her konuda bize yardımcı olan danıőmanlarımız Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gülşah Demirhan Aydın ve Dr. Öğr. Üyesi Deniz Karaçor ayrıca jüri üyelerimiz Sayın Prof. Dr. Sedat Nazlıbilek, Sayın Prof. Dr. Güngör Bal ve Sayın Öğr. Gör. Dr. Hande Bakiler en içten teşekkürlerimizi ve saygılarımızı sunarız. Her zaman yanımızda olarak bize destek olan ailelerimiz ve arkadaşlarımıza sevgilerimizi ve teşekkürlerimizi sunarız.

ETİK KURALLAR UYUM BEYANI

Aşağıda belirtilen Mühendisliğin temel ilkelerini biliyor ve kabul ediyorum.

Berin Işık Aktaş	İMZA/TARİH:
Ozan Varol	İMZA/TARİH:
Meriç Tunca Sali	İMZA/TARİH:

Mühendisler; mühendislik mesleğinin doğruluğunu, onurunu ve değerini insanlığın refahının artması için kendi bilgi ve becerilerini kullanarak, dürüst ve tarafsız olarak halka, kendi işverenlerine ve müşterilerine sadakatle hizmet ederek, mühendislik mesleğinin yeteneğini ve prestijini artırmaya çabalayarak, kendi disiplinlerinin mesleki ve teknik birliğini destekleyerek yüceltir ve geliştirirler.

- Mühendisler, mesleki görevlerini yerine getirirken toplumun güvenliğini, sağlığını ve rahatını en önde tutacaktır.
- Mühendisler, sadece yetkili oldukları alanlarda hizmet vereceklerdir.
- Mühendisler, sadece objektif ve gerçekçi raporlar düzenleyeceklerdir.
- Mühendisler, mesleki konularda işveren veya müşteri için güvenilir vekil veya yardımcı olarak davranacaklar ve çıkar çatışmalarından kaçınacaklardır.
- Mühendisler mesleki itibarlarını hizmetlerinin gereğine göre tesis edecekler ve diğer meslektaşlarıyla haksız rekabete girmeyeceklerdir.
- Mühendisler, meslek doğruluğunu, onurunu ve değerini yüceltmek ve geliştirmek için çalışacaklardır.
- Mühendisler, mesleki gelişmelerini kendi kariyerleriyle devam ettirecekler ve kendi kontrolleri altındaki mühendislerin mesleki gelişmeleri için olanaklar sağlayacaklardır.

Bu raporda herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmış kısımlar %20'den az, ve paragraf halinde birebir alıntı sayısının ise sıfır olduğunu beyan ediyorum.

Berin Işık Aktaş	İMZA/TARİH:
Ozan Varol	İMZA/TARİH:
Meriç Tunca Sali	İMZA/TARİH:

PROJE ÖN DEĞERLENDİRME FORMU

Aşağıda belirtilen maddelerin, yeterli ve gerekli şartları sağlayacak biçimde tamamlanmış olduğu; öğrenci tarafından (Ö) beyan edilecek ve danışman (D) tarafından onaylanacaktır.

	Ö (Evet/Hayır)	D (Onay)
Bu rapor son teslim tarihinden önce teslim edilmiş midir?		
Kapak sayfası var mıdır? Tüm rapor, tek parça halinde ve Bölüm Başkanlığı tarafından ilan edilen formata uygun olarak hazırlanmış mıdır?		
Onay formu doldurulmuş ve tarihli şekilde imzalanmış mıdır?		
Etik kurallar uyum beyanı tarihli şekilde imzalanmış mıdır? Bu rapor, bu beyana uygun olarak hazırlanmış mıdır?		
Özet çalışmaya uygun bir şekilde yazılmış mıdır?		
İçindekiler sayfası verilmiş midir? Rapor ile uyumlu mudur?		
Şekil/Tablo listesi verilmiş midir? Rapor ile uyumlu mudur?		
Giriş kısmı bulunmakta mıdır ve uygun olarak yazılmış mıdır?		
Projeyi ifade eden Kavram Tanımı ve İşletimi (KTİD) belgesi; kısa, anlaşılır ifadeler kullanılarak açıklanmış mıdır?		
Projenin planlanan ve gerçekleşen Proje Uygulama Takvimi (PRUT) verilmiş midir? İş Paketleri (ve sorumluları) tanımlanmış mıdır?		
KTİD'yi açıklayan Proje İsterleri Belirtimi (PİBD) belgesi tasarımı yönlendirecek yapısal gruplandırmaya sahip şekilde sunulmuş mudur?		
Projenin Genel Mimari Tasarımı (PMTD) ; belgesi tamamlanmış mıdır?		
Projenin Proje Risk Tanımlama (PRTD) ; belgesi tamamlanmış mıdır?		
Proje Yönetimi kapsamında hazırlanan; KTİD, PİBD, PRUT, PMTD, PRTD belgeleri kendi aralarında uyumlu, birbirini takip eder ve ilişkili midir?		
Sonuçlar kısmı uygun bir şekilde bulunmakta mıdır? Kapsamlı maliyet analizi yapılmış mıdır?		
Projenin ekleri tam olarak verilmiş midir? Raporun ana metni içinde eklere atıf yapılmış mıdır?		
IEEE Etik Kuralları Ekler kısmında bulunmakta mıdır?		
Kaynakça kılavuzda belirtilen kurallara uygun olarak verilmiş midir?		
Öğrencinin özgeçmişi verilmiş midir?		

Standartlar ve Kısıtlar belgesi, kurallara uygun hazırlanmış mıdır?		
Disiplinlerarası Çalışma belgesi, kurallara uygun hazırlanmış mıdır?		
Kullanım Kılavuzu hazırlanmış mıdır? (Danışman kararı ile)		
Başkent Üniversitesi Yapay Zeka Politikası dokümanındaki esaslara uygun olarak hazırlanmış mıdır?		

ÖZ

Projede, paletli bir çim biçme robotuna entegre edilmek üzere geliştirilen; biçilen çimin vakum yardımıyla toplanması, depolanması, ağırlık izleme, ağırlığa bağlı adaptif hız kontrolü ve otomatik boşaltma işlevlerini bir arada gerçekleştiren akıllı bir modül tasarlanmış ve sistem mimarisi temel hesaplamalarla birlikte oluşturulmuştur. Sistem; maksimum 2.5 kg çim depolayabilen bir hazne, biçilen çimi hazneye taşımak amacıyla kullanılan BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W süpürge motoru, 35 mm çaplı hortum hattı, paletlerin arasında gövde altına sabitlenen süpürge başlığı, hazne altına yerleştirilen HX711 destekli yük hücresi ve hareket sistemine ait hız geri bildirimini sağlayan sensörlerden oluşmaktadır. Süpürge başlığı robot gövdesinin alt kısmında sabit konumlandırılarak biçilen çimin doğrudan emilmesini sağlamaktadır.

Robotun paletli hareket yapısı sayesinde farklı arazi koşullarında daha dengeli ilerleme elde edilirken, haznede biriken yük miktarına bağlı olarak sistemin ilerleme hızı adaptif biçimde kontrol edilmektedir. Haznedeki kütle, hazne altında konumlandırılan yük hücresi ile gerçek zamanlı olarak ölçülmekte; boş haznenin dara değeri referans alınarak net çim ağırlığı hesaplanmaktadır. Bu sayede yük artışına bağlı performans değişimleri izlenebilmekte ve robotun ilerleme hızı optimize edilerek enerji tüketimi ile mekanik zorlanmalar azaltılmaktadır.

Hazne doluluğu 2.5 kg eşiğine ulaştığında sistem otomatik boşaltma moduna geçmektedir. Haznenin dış geometrisi dikdörtgen formda tasarlanmış olmakla birlikte, iç yüzeyler eğimli yapıdadır. Bu nedenle haznenin açılır yan duvarı aktive edildiğinde biriken çim, ek bir itme mekanizmasına ihtiyaç duymadan yerçekimi etkisiyle kendiliğinden dışarı kayarak tahliye edilmektedir. Boşaltma işlemi tamamlandıktan sonra hazne yeniden toplama moduna dönmekte ve yük hücresi boş durum referansını kullanarak ölçüm sürecine devam etmektedir.

Kontrol altyapısında ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyici, motor sürücü kartları, artımlı optik döner enkoder, ACS712 akım sensörü, düşürücü voltaj regülatörleri, MG995 servo motor ve 3.7 V lityum pil grubu kullanılmaktadır. Sistem; motor akımı, hız geri bildirim ve yük verilerini eş zamanlı değerlendirerek adaptif hız kontrol algoritmasını gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Süreç, MATLAB ortamında geliştirilen adaptif hız kontrolü, PID kontrol, ağırlık merkezi analizi ve gürültü filtreleme simülasyonları ile modellenerek sayısal olarak incelenmiştir. Bu yönleriyle proje; enerji verimliliğini destekleyen adaptif kontrol yapısı, yenilikçi robotik sistem entegrasyonu ve çim atıklarının kontrollü yönetimi sayesinde Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları arasında yer alan Amaç 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji, Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı ve Amaç 12: Sorumlu Tüketim ve Üretim ile uyumludur.



ABSTRACT

In the project, an intelligent module was designed to be integrated into a tracked lawn-mowing robot. This module performs grass collection with a vacuum system, storage, weight monitoring, adaptive speed control based on the collected load, and automatic emptying functions together. The system architecture was developed together with the required basic calculations. The system consists of a container capable of storing up to 2.5 kg of grass, a BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W vacuum motor, a 35 mm hose line, a vacuum head fixed under the robot body between the tracks, an HX711-supported load cell placed under the container, and sensors that provide speed feedback from the motion system. The vacuum head is positioned under the robot body to allow the cut grass to be directly sucked into the collection system.

The tracked motion structure provides more stable movement under different terrain conditions. In addition, the forward speed of the robot is adaptively controlled according to the load accumulated in the container. The mass inside the container is measured in real time by the load cell, and the net grass weight is calculated by using the tare value of the empty container as a reference. Thus, load-related performance changes can be monitored, while the robot speed is optimized to reduce energy consumption and mechanical stress.

When the container reaches the 2.5 kg filling threshold, the system switches to automatic emptying mode. Although the external geometry of the container is rectangular, its internal surfaces are inclined. Therefore, when the opening side wall is activated, the accumulated grass slides out under the effect of gravity without requiring an additional pushing mechanism. After emptying, the container returns to collection mode, and the load cell continues the measurement process using the empty-container reference value.

The control infrastructure includes an ESP32-S3-N16R8 microcontroller, motor driver boards, an incremental optical rotary encoder, an ACS712 current sensor, buck voltage regulators, a servo motor, and a lithium battery pack. The system is designed to perform the adaptive speed control algorithm by evaluating motor current, speed feedback, and load data simultaneously. The process was modeled and numerically analyzed in MATLAB through adaptive speed control, PID control, center of gravity analysis, and noise filtering simulations. Through these features, the project is compatible with the United Nations Sustainable Development Goals, particularly Goal 7: Affordable and Clean Energy, Goal 9: Industry, Innovation and Infrastructure, and Goal 12: Responsible Consumption and Production. It supports energy efficiency through adaptive control, contributes to robotic system innovation, and enables controlled management of grass waste.



İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ	11
1.1. Çalışmanın Konusu ve Problemin Tanımı	11
1.2. Çalışmanın Amacı	11
1.3. Projenin Kapsamı	12
1.4. Çalışmanın Gerekçesi ve Katkısı	12
2. PROJENİN ARKA PLANI VE KURAMSAL ÇERÇEVESİ	13
2.1. Literatür	13
2.2. Projenin Özgün Değeri	15
2.2.1. Amaç 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji	17
2.2.2. Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı	17
2.2.3. Amaç 12: Sorumlu Tüketim ve Üretim.....	17
2.3. Projenin Hedefleri	18
3. TASARIM	19
3.1. Akış Şeması	19
3.2. Sistem Mimarisi	22
3.3. Hesaplamalar	23
3.3.1. Hazne Hacmi ve Çim Kapasitesi	23
3.3.2. Ağırlığa Bağlı Adaptif Hız Kontrol Modeli	25
3.3.3. Oluşan Tork ve Yük Dağılımı	26
3.3.4. Vakum Motoru Güç ve Tork Gereksinimi	27
3.4. Komponentler	29
3.4.1. ESP32-S3-N16R8 Mikrokontrolcü (MCU)	29
3.4.2. Motor Sürücü Kartları	31
3.4.3. Ağırlık Sensör Seti	32
3.4.4. Artımlı Optik Döner Enkoder	33

3.4.5. BLDC-VKT4546 Vakum Motoru	34
3.4.6. DC Motorlar.....	35
3.4.7. MG995 Servo Motor.....	36
3.4.8. NX-Buck3A Fixed Düşürücü Voltaj Regülatörü	37
3.4.9. 3 Seri 3 Paralel Lityum-İyon Pil Grubu	38
3.5. Gantt Şeması	39
4. SİMÜLASYONLAR VE TEKNİK ÇİZİM.....	41
4.1. MATLAB Simülasyonları.....	41
4.1.1. Adaptif Hız Grafikleri	41
4.1.2. PID Kontrol Grafikleri	47
4.1.3. Haznenin Dolumuna göre Ağırlık Merkezi Simülasyon ve Grafikleri	51
4.1.4. Filtreleme Grafikleri	56
4.2. Teknik Çizim.....	64
5. SONUÇLAR	67
5.1. Risk Yönetim Tablosu.....	67
5.2. Maaliyet Tablosu	69
6. ETKİ BEYANI	70
7. KAYNAKLAR	
KAYNAKÇA.....	
EK-A Kavram Tanımlama ve İşletim Dökümanı(KTİD)	
EK-B Proje İsterleri Belirtimi Dökümanı(PİBD)	
EK-C Proje Uygulama Takvimi(PRUT)	
EK-D Proje Mimari Tasarım Dökümanı(PMTD).....	
EK-E YAPAY ZEKA KULLANIMI BEYANI VE IEEE ETİK KURALLARI	
EK-F Standartlar ve Kısıtlar	
EK-G Disiplinler Arası Çalışmalar.....	
EK-H Kodlar.....	

Şekil No	Açıklama	Sayfa No
Şekil 2.2.1.	Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	16
Şekil 2.2.2.	Koşulları Sağlayan Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri	18
Şekil 3.1.1.	Projenin Akış Şeması	19
Şekil 3.4.1.	ESP32-S3-N16R8 MCU	30
Şekil 3.4.2.	Motor Sürücü Kartı	31
Şekil 3.4.3.	Ağırlık Sensörü ve HX711	32
Şekil 3.4.4.	Artımlı Optik Döner Enkoder	33
Şekil 3.4.5.	BLDC-VKT4546 Vakum Motoru	34
Şekil 3.4.6.	DC Motorlar	35
Şekil 3.4.7.	MG995 Servo Motor	36
Şekil 3.4.8.	NX- Buck3A Voltaj Regülatörü	37
Şekil 3.4.9.	3.7 V Lityum-İyon Pil	38

Şekil No	Açıklama	Sayfa No
Şekil 3.5.	Gantt Şeması	39
Şekil 4.1.1.1.	Yük Durumuna göre RPM ve Adaptif Hız Kontrollü İlerleme Hızı ve Boşaltmayı Gerçekleştiren Servo Motor Hareketi Grafikleri	45
Şekil 4.1.2.1.	PID Kontrol ile Referans Hız Takibi Grafiği	48
Şekil 4.1.2.2.	Yük Torku ve Bozucu Etkiler Grafiği	49
Şekil 4.1.3.1.	Eğimli Hazne Duvarında yükselen Çim ve Ağırlık Merkezi Simülasyonu	52
Şekil 4.1.3.2.	Eğimli Hazne Duvarında yükselen Çim ve Ağırlık Merkezi Simülasyonu	53
Şekil 4.2.3.3.	Ağırlık Merkezi Değişiklikleri Grafikleri	53
Şekil 4.1.4.1.	Gerçek Kütle Davranışına göre Gürültü Simülasyonları	56
Şekil 4.1.4.2.	Simülasyon Çıktısı	56
Şekil 4.1.1.	Haznenin Teknik Çizimi	58
Şekil 4.1.2.	Haznenin Teknik Çizimi	58

TABLULAR

Tablo No	Açıklama	Sayfa No
Tablo 5.1.	Risk Yönetim Tablosu	61
Tablo 5.2.	Maaliyet Tablosu	63

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Konusu ve Problemin Tanımı

Otonom ve yarı otonom çim biçme makineleri son yıllarda konut, peyzaj ve endüstriyel alan bakımında yaygın olarak kullanılmaya başlanmış olsa da, bu sistemlerin önemli bir bölümünde biçilen çimlerin toplanması ve depolanması süreci hâlâ manuel müdahale gerektirmektedir. Toplama haznesinin dolması durumunda makinenin durdurulması, haznenin kullanıcı tarafından boşaltılması ve işlemin yeniden başlatılması gerekliliği, çalışma sürekliliğini kesintiye uğratan ve verimliliği azaltan önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Ayrıca haznedeki biriken çim miktarına bağlı olarak sistem yükünün değişmesi, mobil robotun hareket performansını etkileyebilecek bir unsur olarak değerlendirilmektedir.

Çalışmanın konusu, çim toplama sürecinin bu zayıf halkasını ortadan kaldırarak çimin vakumla hazneye çekilmesi, depolanması, doluluk miktarının sensör tabanlı olarak izlenmesi, yük değişimine bağlı adaptif hız kontrolünün sağlanması ve hazne belirlenen eşik değere ulaştığında otomatik boşaltma sürecinin devreye alınması gibi işlevleri entegre bir yapı içerisinde gerçekleştiren akıllı bir modülün tasarlanmasıdır. Sistem, paletli bir çim biçme robotuna entegre edilmiş modüler bir alt bileşen olarak ele alınmakta ve robotun biçme mekanizması dışında kalan çim toplama, depolama, yük izleme, adaptif hız kontrolü ve boşaltım süreçlerinin bağımsız bir alt sistem üzerinden yönetilmesini hedeflemektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Çalışmanın temel amacı, çim toplama sürecini kesintisiz, güvenilir ve kullanımdan bağımsız bir yapıya dönüştürmek, hazne doluluğunun manuel takibine olan ihtiyacı ortadan kaldırmak ve yük artışına bağlı olarak sistem davranışının kontrol edilebilir ve izlenebilir bir yapıya kavuşturulmasını sağlamaktır. Bu doğrultuda geliştirilen sistem, çimin vakumla hazneye taşınmasını sağlayan BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W süpürge motoru, 35 mm çaplı hortum ve süpürge başlığı, maksimum 2.5 kg çim depolayabilen toplama haznesi, hazne altına yerleştirilen yük hücresi ile çalışan ağırlık ölçüm sistemi ve hazne duvarının kontrollü şekilde açılmasını sağlayan otomatik boşaltma mekanizmasından oluşmaktadır.

Haznedeki kütle, yük hücresi üzerinden gerçek zamanlı olarak izlenmekte; boş haznenin tara değeri referans alınarak net çim ağırlığı hesaplanmaktadır. Yük artışı, paletli sistemin adaptif hız kontrolüyle ilişkilendirilmekte ve böylece sistemin yük değişimine rağmen daha dengeli ve kontrollü çalışması hedeflenmektedir. Hazne kütlesi belirlenen 2.5 kg eşik değerine ulaştığında otomatik boşaltma süreci başlatılmakta, haznenin eğimli iç yapısı sayesinde çimin kendiliğinden tahliye edilmesi sağlanmakta ve boşaltım tamamlandığında sistem yeniden toplama moduna dönmektedir.

1.3. Projenin Kapsamı

Proje kapsamında çim toplama ve depolama modülünün mekanik, elektriksel ve kontrol odaklı bileşenleri mühendislik bakış açısıyla ele alınmış ve sistemin işleyişine ilişkin temel tasarım parametreleri belirlenmiştir. Vakum hattına ilişkin hava akışı, hava hızı ve hortum çapı seçimleri akış karakteristikleri dikkate alınarak değerlendirilmiş; çimin hazneye aktarılması için 35 mm çaplı hortum ve gövde altında paletlerin arasında sabit konumlandırılan süpürge başlığı kullanılması planlanmıştır. Hazne dolum davranışı, çim yoğunluğu ve maksimum 2.5 kg depolama kapasitesi dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Haznedeki yükün izlenmesi, hazne altına yerleştirilen yük hücresi tabanlı statik ölçüm yaklaşımıyla gerçekleştirilirken, yük değişiminin sistem hareketine etkisi motor akımı ve hareket hızı verileriyle birlikte analiz edilmiştir. Güç gereksinimleri, kullanılan süpürge motoru, tahrik elemanları, sensörler ve kontrol birimlerinin çalışma gerilimlerine uygun olacak şekilde düşürücü regülatörler üzerinden dağıtılacak biçimde modellenmiştir. Adaptif hız kontrolü, PID kontrol, ağırlık merkezi belirlenmesi ve gürültü filtreleme süreçleri MATLAB ortamında simüle edilerek sistem davranışı zamana bağlı olarak analiz edilmiş ve tasarım kararları sayısal verilerle desteklenmiştir. Proje kapsamı çim toplama, depolama, ağırlık izleme ve otomatik boşaltma modüllerini içermekte olup, çimin fiilen kesilmesine yönelik biçme mekanizması çalışmanın kapsamı dışında bırakılmıştır.

1.4. Çalışmanın Gerekçesi ve Katkısı

Mevcut çim toplama ve depolama sistemlerinde hazne doluluğunun operatör tarafından takip edilmesi ve manuel boşaltım nedeniyle uygulama kesintiye uğramaktadır. Yük artışı ile sistemin hareket performansı arasındaki ilişkinin kontrolsüz gerçekleşmesi de karşılaşılan problemler arasındadır. Bu proje ile hazne doluluğunun sensör tabanlı olarak izlenmesi, boşaltım sürecinin otomatik hâle getirilmesi, paletli sistemin yük durumuna bağlı olarak adaptif hız kontrolü ile çalıştırılması ve sistem davranışının simülasyon ortamında önceden değerlendirilmesi sağlanmıştır.

Böylece yalnızca mekanik bir toplama sistemi değil, ölçüm, karar verme ve eylem bileşenlerinin birlikte çalıştığı akıllı bir modül geliştirilmesine yönelik bütünlük bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Çalışmanın, otonom çim biçme sistemlerine entegre edilebilir sensör destekli depolama, yük değişimine bağlı adaptif hız kontrolü ve otomatik boşaltım yapıları açısından literatüre ve uygulamaya katkı sağlaması hedeflenmektedir..

2. PROJENİN ARKA PLANI VE KURAMSAL ÇERÇEVESİ

2.1. Literatür

Gupta ve Kumar'ın (2025) [1] çalışmasında, otonom çim biçme makinelerinde kullanılan sensör teknolojileri, kontrol yapıları ve enerji verimliliği odaklı sistem mimarileri kapsamlı biçimde ele alınmış; bu tür makinelerin gelecekte otomasyon, sürdürülebilirlik ve insan müdahalesinin azaltılması yönünde gelişim göstereceği vurgulanmıştır. Çalışmada özellikle sensör verilerinin sistem karar mekanizmalarıyla bütünleşmesi, yük değişimlerinin makine davranışına yansıtılması ve enerji tüketiminin çalışma koşullarına göre optimize edilmesi gerekliliği üzerinde durulmuştur. Bu yaklaşım, proje kapsamında geliştirilen yük izleme, adaptif hız kontrolü ve sensör tabanlı karar yapısı ile doğrudan örtüşmekte olup çalışmanın teorik gerekçesini güçlendirmektedir. Söz konusu çalışmada çim toplama ve depolama alt sistemlerinin ayrı bir modül olarak ele alınmadığı ağırlık izleme ve otomatik boşaltma fonksiyonlarının sistemsel kapsam dışında kaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak proje kapsamında geliştirilen modüler vakum–depolama–boşaltma yapısının literatürde daha sınırlı ele alınan bir problem alanına karşılık geldiğini göstermektedir.

Santhoshini'nin (2024) [2] çalışmasında ise akıllı çim bakım sistemlerine yönelik bir otomatik çim biçme makinesi tasarımı sunulmuş ve sistemin değişken çim yoğunluğu, yer geometrisi ve çevresel koşullara uyum sağlayabilmesi için otomasyon tabanlı kontrol yaklaşımlarına ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Çalışma; hareket kontrolü, alan taraması ve görev planlama gibi konulara odaklanmakta olup, çim toplama ve depolama süreçleri daha çok operasyonel bir çıktı olarak ele alınmıştır. Bu yönüyle Santhoshini'nin çalışması, çim biçme sistemlerinin otonomlaşmasına ilişkin bütüncül çerçeveyi ortaya koyarken, proje kapsamında geliştirilen sensör tabanlı depolama ve otomatik boşaltma modülünün doğrudan odaklandığı teknik problemlere sınırlı biçimde değinmektedir. Bu durum, mevcut proje çalışmasının, otonom çim biçme teknolojilerinin daha az incelenmiş ancak pratik kullanımıyla kritik bir alt bileşenine odaklanması bakımından özgün bir pozisyon oluşturduğunu göstermektedir.

Yang ve çalışma arkadaşları (2022) [3] GA-FNC algoritmasıyla desteklenen çift çevrimli adaptif PID kontrol yapısının DC motorlarda hız kararlılığını belirgin şekilde iyileştirdiğini ve yük değişimlerine karşı daha dengeli bir hız tepkisi ürettiğini ortaya koymuştur.

Wang ve ekibi (2022) [4] tarafından geliştirilen çift bulanık mantık tabanlı PID denetleyici ise BLDC motorlarda hem denge noktası hatasını düşürmüş hem de dinamik geçiş davranışını iyileştirmiştir. Bu çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, motor hızının yalnızca sabit referans değerler üzerinden değil, yük, tork ve sistem zorlanma koşulları dikkate alınarak adaptif bir yaklaşımla kontrol edilmesi gerektiği açık şekilde ortaya konmaktadır.

Proje kapsamında üfleyici motorun, haznedeki çim kütesinin artışı ve vakum hattındaki akış direncinin yükselmesi gibi yük artışı durumlarında hız ve güç üretimini kararlı biçimde sürdürebilmesi amacıyla adaptif kontrol yaklaşımının tercih edilmesi, literatürde sunulan bu bulgularla uyumlu bir mühendislik kararına dayanmaktadır.

Sharma'nın (2021) [5] çalışmasında BLDC motorlarda akım ve devir verileri kullanılarak tork tahmini yapılabildiği ve bu yöntemin sensörsüz yük izleme ve motor zorlanma analizinde etkili bir araç olduğu gösterilmiştir.

ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE, 2014) [6] raporunda da motor yükünün akım, gerilim ve hız ölçümleri üzerinden hesaplanabildiği vurgulanmış; bu yaklaşımın enerji verimliliği, sistem sağlığı ve bakım stratejileri açısından kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Bu literatür bulguları, proje kapsamında kullanılan akım geri bildirim ve yük-hız ilişkisine dayalı değerlendirme yaklaşımını desteklemekte; sistemde dinamik yük izleme ve adaptif karar mekanizmasının uygulanmasını mühendislik açısından gerektirmektedir. Böylece proje, yalnızca mekanik bir toplama sistemi değil, aynı zamanda yük izleme odaklı veri temelli bir kontrol yaklaşımını da içeren bir yapı kazanmaktadır.

Projeye bağlantılı patentler bağlamında, US11,716,931 B2 numaralı patentte [7] hazne dolduğunda devreye giren aktüatörlü alt kapak mekanizmaları tanımlanmış ve otomatik boşaltım yapısının mekanik tasarım ilkeleri açıklanmıştır. EP3871485B1 numaralı patentte [8] ise çim biçme makinelerinde motor hızının yük değişimlerine bağlı olarak ayarlanmasını sağlayan bir kontrol yöntemi sunulmuştur. Bu patent yapıları, otomatik boşaltım ve yük tabanlı motor kontrolünün endüstriyel uygulamalarda ihtiyaç duyulan fonksiyonlar olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu patentlerde sensör tabanlı ağırlık ölçümü, depolama doluluğunun kütle verisiyle izlenmesi ve ağırlık temelli adaptif kontrol yaklaşımının doğrudan bütünleşik bir yapı olarak ele alınmadığı görülmektedir. Bu noktada proje çalışması, çim toplama ve depolama modülü özelinde ağırlık ölçümü – yük izleme – adaptif kontrol – otomatik boşaltma bileşenlerini tek bir modüler yapı içinde birleştirmesi bakımından literatür ve patent tabanlı mevcut yaklaşımlardan ayrılan özgün bir mühendislik katkısı sunmaktadır.

Bruzzone, Nodehi ve Fanghella (2022) [9] çalışmasında kara mobil robotlarında kullanılan paletli hareket sistemleri incelenmiştir. Paletli sistemlerin engebeli ve yumuşak zeminlerde daha iyi tutunma sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma, çim toplama makinesinin dış ortamda ve artan yük altında kararlı hareket edebilmesi için uygun hareket sistemi seçimine literatür desteği sağlamaktadır.

Liao ve arkadaşları (2021) [10] otomatik robotik çim biçme makinesinin tasarım ve üretim sürecini ele almıştır. Çalışma, robotik çim biçme sistemlerinin hareket, kesme ve algılama birimlerini incelemektedir. Bizim projemiz bu çalışmadan farklı olarak kesilen çimi vakumla hazneye alması, ağırlık sensörüyle yükü ölçmesi, hızı yüke göre ayarlaması ve 2,5 kg'da otomatik boşaltma yapmasıyla literatüre katkı sunmaktadır.

Gao ve arkadaşları (2025) [11] engebeli arazide çalışabilen pasif süspansiyonlu paletli mobil robotun tasarım ve kontrolünü incelemiştir. Çalışma, arazi koşullarında robot dengesinin korunmasına odaklanmaktadır. Bu kaynak, hazne doldukça ağırlığı artan çim toplama makinesinin dengeli ve güvenli hareket etmesi gerekliliğini desteklemektedir.

Jeon ve Lee (2023) [12] paletli mobil robotlarda arazi eğimlerine göre hız telafisi yapılmasını ele almıştır. Çalışma, değişen arazi koşullarına göre hız kontrolünün önemini göstermektedir. Bizim projemizde hız telafisi arazi eğimine değil, haznede biriken çimin oluşturduğu yüke göre yapılmaktadır; bu yönüyle adaptif hız kontrolü yaklaşımını farklı bir uygulama alanına taşımaktadır.

Hiramatsu ve arkadaşları (2019) [13] engebeli arazide paletli mobil robotlar için yol takip kontrolörü geliştirmiştir. Çalışma, dış ortam koşullarının robot hareket doğruluğunu etkileyebileceğini göstermektedir. Bu kaynak, çim toplama makinesinin açık alanda yük değişimi altında kontrollü hareket etmesi gerektiğini desteklemektedir.

Iossaqui, Camino ve Zampieri (2010) [14] bilinmeyen kayma parametresine sahip paletli mobil robotlar için adaptif takip kontrolü önermiştir. Çalışma, belirsizlik durumlarında adaptif kontrolün önemini ortaya koymaktadır. Projemizdeki ağırlık sensörüne bağlı hız kontrolü de değişken yükten kaynaklanan belirsizliği azaltmaya yönelik pratik bir adaptif kontrol uygulamasıdır.

Pollak, Gupta ve Göhlich (2024) [15] otonom hizmet robotlarında çöp kutularının tahmin edilen doluluk seviyelerine göre operasyon yönetimini incelemiştir. Çalışma, doluluk bilgisinin robot kararlarında önemli bir veri olduğunu göstermektedir. Projemizde de hazne doluluğu ağırlık sensörüyle ölçülerek hız kontrolü ve otomatik boşaltma kararında kullanılmaktadır.

[16] Justo ve arkadaşları (2023) [16] otonom atık yönetimi robotlarında minimum enerji kullanım stratejisini ele almıştır. Çalışma, doluluk ve görev planlamasının enerji verimliliği üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Projemizde artan yüke göre hızın düşürülmesi, motor zorlanmasını ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik bir yaklaşım sunmaktadır.

Arthur, Shoba ve Pandey (2024) [17] IoT ve derin öğrenme tabanlı akıllı çöp kutusu sistemlerini incelemiştir. Çalışma, doluluk takibi ve otomatik atık yönetiminin önemini ortaya koymaktadır. Bizim projemizde haznedeki çim miktarı doğrudan ağırlık sensörüyle ölçülmekte ve bu bilgi sistem kontrolünde kullanılmaktadır.

Zoumpoulis ve arkadaşları (2024) [18] akıllı şehirlerde sürdürülebilir atık yönetimi için akıllı kutu sistemlerini incelemiştir. Çalışma, otomasyon ve kaynak geri kazanımı açısından akıllı haznelerin önemini vurgulamaktadır. Projemiz, kesilmiş çimi kontrollü şekilde toplayıp otomatik boşaltarak bu yaklaşımı çim toplama alanına uyarlamaktadır.

Farré ve arkadaşları (2023) [19] pnömatik kentsel atık toplama sistemlerini incelemiştir. Çalışma, atıkların hava akışı veya vakum yardımıyla taşınmasının avantajlarını açıklamaktadır. Projemizde kesilen çimin vakumla hazneye alınması, bu pnömatik taşıma prensibinin mobil ve küçük ölçekli bir çim toplama makinesine uygulanması açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

2.2. Projenin Özgün Değeri

Proje, çim toplama ve depolama sürecini yalnızca mekanik bir işlev olmaktan çıkararak sensör tabanlı veri toplama, adaptif hız kontrolü, otomatik boşaltma ve yük izleme mekanizmalarını tek bir modüler yapı içerisinde bir araya getirmesi bakımından özgün bir mühendislik yaklaşımı ortaya koymaktadır. Geliştirilen sistemin en temel özgün değeri, çim toplama ve depolama sürecinin kullanıcı müdahalesine ihtiyaç duymadan otonom olarak yönetilebilmesidir. Hazne doluluğunun ağırlık sensörü ile gerçek zamanlı izlenmesi, 2.5 kg seviyesinde otomatik boşaltma mekanizmasının devreye girmesi ve sistemin toplama–boşaltma çevrimlerini kendi kendine sürdürebilmesi, mevcut çim biçme makinelerinde yaygın olarak görülen manuel boşaltma gereksinimini azaltmakta ve operasyonel sürekliliği artırmaktadır. Proje, özellikle geniş alan uygulamalarında kullanıcı bağımlılığını azaltan ve süreç verimliliğini artıran bir otonom sistem yaklaşımı sunmaktadır.

Sistemin bir diğer önemli özgün değeri, düşük enerji tüketimi odaklı kontrol stratejisi ile tasarlanmış olmasıdır. Paletli hareket sisteminin hızı, haznedeki kütle artışı ve dinamik yük durumu dikkate alınarak adaptif biçimde ayarlanmaktadır. Yük artışına rağmen sistemin gereksiz güç tüketmeden dengeli şekilde ilerlemesi, enerji tüketiminin çalışma koşullarına uyarlanması ve mekanik zorlanmaların kontrol altında tutulması; hem donanım ömrünü uzatmakta hem de enerji verimliliği açısından önemli bir kazanım sağlamaktadır. Bu bağlamda proje, yalnızca işlevsel bir toplama sistemi değil, aynı zamanda enerji duyarlı ve yük odaklı mühendislik çözümlerine dayanan bir kontrol yaklaşımı geliştirmektedir.

Geliştirilen modülün bakım gereksiniminin düşük olması da özgün değer unsurlarından biridir. Sensör tabanlı izleme sayesinde sistemde yük, doluluk ve çalışma durumu sürekli takip edilmekte; mekanik zorlanmalar en aza indirilecek şekilde tasarım tercihleri yapılmaktadır. Boşaltma mekanizmasının haznenin açılır yan duvarı üzerinden gerçekleştirilmesi ve hazne iç yüzeylerinin eğimli tasarlanması, çimin ek bir itici mekanizmaya ihtiyaç duyulmadan yerçekimi etkisiyle tahliye edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede karmaşık mekanik aktarma sistemlerine duyulan ihtiyaç azaltılmış; bakım maliyeti ve arıza olasılığı düşürülmüştür. Böylece sistem, saha koşullarında uzun süreli ve kararlı çalışma gerektiren uygulamalar için avantaj sağlamaktadır.

Proje süresince çevre dostu ve sürdürülebilir tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Haznenin doluluk seviyesinin doğrudan kütle üzerinden izlenmesi, gereksiz çalışma çevrimlerinin önüne geçmekte; enerjinin yalnızca gerekli çalışma koşullarında kullanılmasını desteklemektedir. Yük izleme ve enerji tüketimi arasındaki ilişkiye odaklanan kontrol mimarisi, hem donanım ömrünün uzatılması hem de kaynak kullanımının optimize edilmesi açısından çevresel etkiyi azaltan bir mühendislik yaklaşımı sunmaktadır. Bu yönüyle proje, yalnızca teknik performansa değil, sürdürülebilir sistem tasarımı ilkelerine de katkı sağlamaktadır.

Son olarak geliştirilen modülün farklı sistemlere ölçeklenebilir ve uyarlanabilir olması, projenin uygulama alanını genişleten bir başka özgün değer unsurudur. Sistem, yalnızca küçük ölçekli robotik çim biçme makinelerine değil; farklı kapasiteye sahip çim toplama araçları, tarımsal vakum sistemleri ve otonom bakım ekipmanlarına entegre edilebilecek şekilde modüler olarak tasarlanmıştır. Böylece proje, belirli bir prototip çözümden ziyade, farklı ölçek ve kapasite düzeylerine uyarlanabilen bir teknoloji bileşeni niteliği taşımaktadır.

Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri dikkate alınarak geliştirilen bu projede enerji verimliliğini artıran adaptif kontrol yaklaşımı, kaynak kullanımını azaltan otomasyon yapısı ve çevresel etkiyi minimize eden sistem mimarisi; sürdürülebilir üretim, temiz enerji kullanımı ve sorumlu kaynak yönetimi ilkeleriyle örtüşmektedir. Mühendislik projelerinde sürdürülebilirlik perspektifinin dikkate alınması, geliştirilen teknolojilerin yalnızca işlevsel açıdan değil, toplumsal ve çevresel etki boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesini mümkün kılmakta ve teknolojik çözümlerin uzun vadeli fayda üretme kapasitesini artırmaktadır. Bağlamsal olarak proje, hem teknik açıdan yenilikçi bir mühendislik yaklaşımı sunmakta hem de sürdürülebilir tasarım anlayışına katkı sağlamaktadır.



Şekil 2.2.1. Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

Proje, geliştirdiği enerji verimliliği odaklı kontrol yaklaşımı, kaynak kullanımını optimize eden otomasyon yapısı ve modüler uyarlanabilirlik özellikleriyle Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden özellikle Amaç 7, Amaç 9 ve Amaç 12 ile ilişkilidir. Sistem tasarımında yalnızca teknik performans değil, aynı zamanda enerji kullanımının azaltılması, donanım ömrünün uzatılması ve sürdürülebilir üretim prensiplerine uygun mühendislik çözümlerinin uygulanması hedeflenmiştir. Böylece proje, teknolojik bir tasarım çalışmasının ötesine geçerek çevresel etkileri gözeten ve kaynak verimliliğine katkı sağlayan bir çerçeve sunmaktadır.

2.2.1. Amaç 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji

Proje kapsamında geliştirilen vakum ve depolama modülü, enerji tüketiminin çalışma koşullarına bağlı olarak optimize edilmesi üzerine tasarlanmıştır. Haznedeki kütle artışı ve sistemin yük durumu sensör verileri üzerinden izlenmekte; paletli hareket sisteminin hızı, yük değişimine bağlı olarak adaptif biçimde düzenlenmektedir. Bu sayede sistem, artan hazne yüküne rağmen gereksiz enerji tüketiminden kaçınacak şekilde daha dengeli ve kontrollü çalışmaktadır. Adaptif hız kontrol stratejisinin uygulanması, hareket sisteminin gereksiz zorlanmasını önlemekte ve çalışma sürekliliğini koruyarak enerji verimliliğine katkı sağlamaktadır. Bu yönüyle proje; akıllı enerji kullanımı, elektrikli sistemlerde verimli güç yönetimi ve düşük tüketimli otomasyon uygulamaları açasından Amaç 7 ile uyum göstermektedir.

2.2.2. Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı

Geliştirilen sistem, yalnızca belirli bir prototip çim biçme robotuna ait bir bileşen olarak değil, farklı ölçekteki sistemlerde uygulanabilecek modüler bir teknoloji platformu olarak tasarlanmıştır. Vakum, depolama, ağırlık ölçümü, adaptif hız kontrolü ve otomatik boşaltma yapısının birlikte çalışması; tarım teknolojileri, bakım robotları ve endüstriyel toplama ekipmanlarına uyarlanabilir niteliktedir. Sensör tabanlı yük izleme, veri odaklı karar yapısı ve adaptif kontrol mimarisi, otonom sistemler alanında yenilikçi bir yaklaşım ortaya koymakta; bakım gereksinimini azaltan ve sistem dayanıklılığını artıran bir altyapı oluşturmaktadır. Bu doğrultuda proje, mühendislikte yenilikçi tasarım, otonom sistem entegrasyonu ve akıllı makine altyapısının geliştirilmesi bakımından teknolojik katkı sunmaktadır.

2.2.3. Amaç 12: Sorumlu Tüketim ve Üretim

Proje, kaynak kullanımını minimize eden ve ekipman ömrünü uzatan bir mühendislik yaklaşımı ile geliştirilmiştir. Haznenin doluluk seviyesinin doğrudan kütle üzerinden izlenmesi, gereksiz çalışma çevrimlerinin önüne geçmekte; otomatik boşaltma mekanizması sayesinde makinenin operasyonu kesintisiz ve kontrollü biçimde sürdürülmektedir. Bu yapı, hem hareket sistemi hem de mekanik bileşenlerin aşırı zorlanmasını önleyerek donanım yıpranmasını azaltmakta, bakım ve parça değişim ihtiyacını düşürmektedir. Enerji tüketiminin yük durumuna bağlı olarak düzenlenmesi ve sistemin değişen koşullara göre adaptif davranması, sorumlu üretim ve verimli kaynak kullanımı anlayışına katkı sağlamaktadır. Bu çerçevede proje, enerji, malzeme ve bakım kaynaklarının bilinçli ve optimize edilmiş biçimde kullanılmasını desteklemekte ve Amaç 12 ile uyumlu bir mühendislik çözümü ortaya koymaktadır.

Bu kapsamda proje; enerji verimliliği, sürdürülebilir otomasyon ve ölçeklenebilirlik boyutlarıyla değerlendirildiğinde, yalnızca akademik bir tasarım çalışması değil, aynı zamanda sürdürülebilir ve toplumsal fayda odaklı bir teknoloji geliştirme girişimi niteliği taşımaktadır.



AMAÇ 7:
ERİŞİLEBİLİR VE TEMİZ
ENERJİ



AMAÇ 9:
SANAYİ, YENİLİKÇİLİK
VE ALTYAPI



AMAÇ 12:
SORUMLU TÜKETİM
VE ÜRETİM

Şekil 2.2.2. Koşulları Sağlayan Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri

2.3. Projenin Hedefleri

Proje kapsamında adaptif hız kontrollü vakum–depolama–boşaltma sistemi; mekanik yerleşim, elektronik bağlantılar, sensör entegrasyonu, vakum hattı, hazne yapısı, otomatik boşaltma mekanizması ve paletli hareket sistemi prototip üzerinde bir araya getirilmiştir.

Temel hedef, tamamlanan prototip üzerinden elde edilen bilimsel ve teknik sonuçların akademik platformlarda paylaşılmasıdır. Bu kapsamda, gerçekleştirilen testlerden elde edilen bulguların ulusal veya uluslararası bir konferansta sunulması hedeflenmektedir. Konferans sunumunun; sistem tasarımı, prototip entegrasyonu, yük değişimine bağlı adaptif hız kontrolü, otomatik boşaltma yapısı ve deneysel doğrulama çıktıları üzerine odaklanarak hem literatür hem de uygulama alanı açısından katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

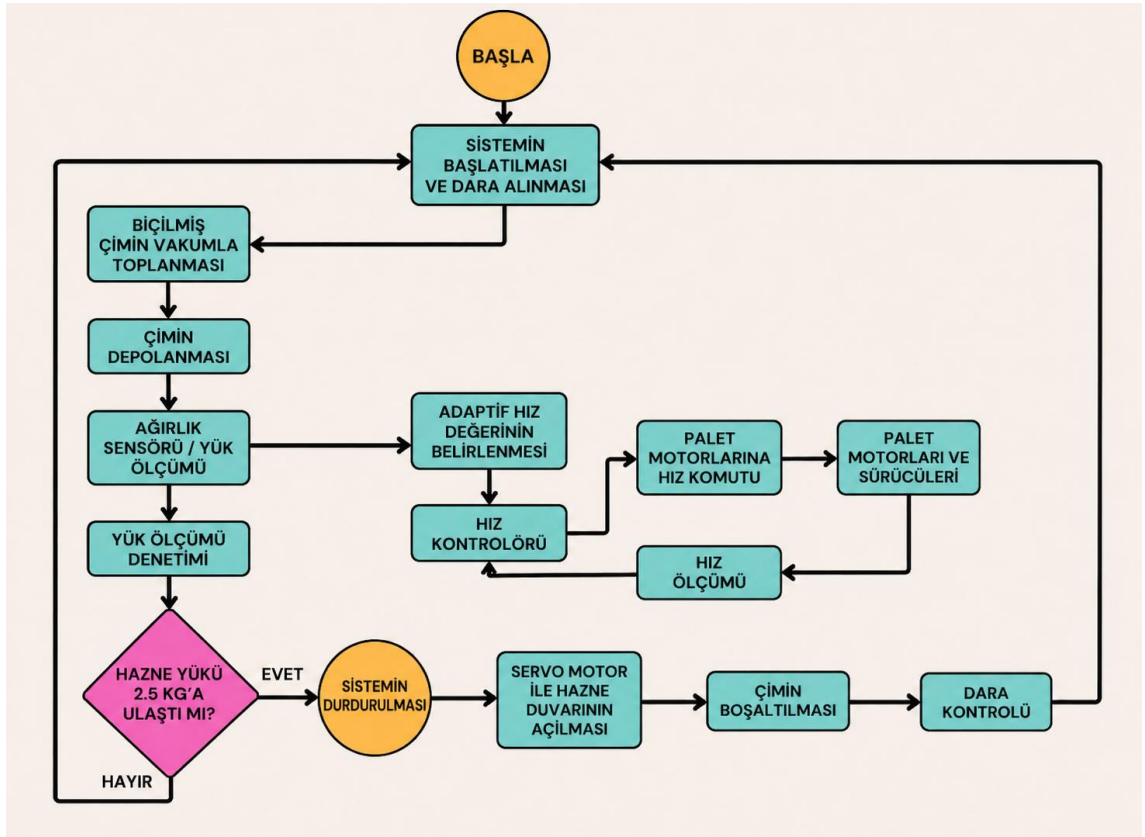
Geliştirilen sistem ve testlerden elde edilen deneysel bulguların, uygun akademik değerlendirme süreçlerinden geçirilerek ulusal ya da uluslararası bir bilimsel dergide yayımlanması hedeflenmektedir. Yayımlanacak çalışmada sistemin mühendislik tasarımı, kontrol algoritması, enerji verimliliği performansı, prototip uygulaması ve farklı ölçeklere uyarlanabilirlik potansiyelinin bilimsel toplulukla paylaşılması planlanmaktadır. Böylece proje, yalnızca teorik bir tasarım çalışması olmaktan çıkarak prototip düzeyinde gerçekleştirilmiş ve deneysel doğrulama aşamasına hazırlanmış bir mühendislik uygulaması niteliği kazanmaktadır.

Uzun vadeli hedeflerden biri ise geliştirilen sistemin saha kullanımına yönelik uygulanabilirliğinin artırılması ve farklı ölçeklerde değerlendirilebilir bir teknoloji bileşeni hâline getirilmesidir. Bu doğrultuda, sistemin uzun süreli çalışma koşullarında test edilmesi ve belediyeler, stadyum işletmeleri ile park–bahçe bakım ekipleri tarafından kullanılacak bir modül olarak geliştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece tamamlanan prototipin, geniş alan bakım otomasyonuna katkı sağlayacak şekilde olgunlaştırılması amaçlanmaktadır.

3. TASARIM

3.1. Akış Şeması

Akış şeması, bir sistemin veya sürecin çalışma mantığını işlevsel adımlar, karar mekanizmaları ve kontrol döngüleri üzerinden görsel ve sistematik biçimde ifade etmek amacıyla kullanılır. Özellikle karmaşık mühendislik sistemlerinde bileşenler arasındaki etkileşimi, veri akışını ve karar noktalarını açık hâle getirerek tasarımın anlaşılabilirliğini artırır; hata analizi ve kontrol algoritmalarının doğrulanmasına katkı sağlar. Bu doğrultuda, yük değişimine bağlı adaptif hız kontrolüne sahip çim toplama, depolama ve otomatik boşaltma sisteminin akış şeması aşağıda verilmiştir. (Şekil 3.1.1)



Şekil 3.1.1. Projenin Akış Şeması

Geliştirilen sistemin çalışma yapısı, akış şemasında görüldüğü üzere birbiriyle veri alışverişi içinde olan modüler bileşenler üzerine kuruludur. Sistem, başlangıç durumunun aktif hâle getirilmesi ve hazne için dara değerinin alınması ile çalışmaya başlamaktadır. Bu aşamadan sonra biçilen çimin vakum yardımıyla toplanması, haznede depolanması, depolanan kütle için ağırlık sensörü aracılığıyla izlenmesi, yük değişimine bağlı olarak paletli sistemin hızının adaptif biçimde kontrol edilmesi ve hazne belirlenen eşik değere ulaştığında otomatik boşaltma işleminin gerçekleştirilmesi süreçleri ardışık ve geri beslemeli bir yapı içinde yürütülmektedir.

Sistem çalıştırıldığında ilk olarak “Sistemin Başlatılması ve Dara Alınması” adımı gerçekleştirilir. Bu aşamada haznenin boş ağırlığı referans değer olarak belirlenmekte ve sonraki ölçümlerde yalnızca haznede biriken net çim miktarının hesaplanması sağlanmaktadır. Böylece ağırlık sensöründen alınan veriler, haznenin kendi ağırlığından bağımsız olarak değerlendirilmekte ve doluluk durumu daha doğru biçimde izlenmektedir. Dara alma işleminin ardından sistem toplama döngüsüne geçmektedir.

Toplama döngüsünde, daha önce biçilmiş olan çim vakum yardımıyla süpürge başlığı ve hortum hattı üzerinden hazneye aktarılmaktadır. Bu aşama akış şemasında “Biçilmiş Çimin Vakumla Toplanması” ve “Çimin Depolanması” adımlarıyla gösterilmiştir. Sistemin amacı çimi kesmek değil, biçilen çimi toplamak ve hazne içerisinde depolamaktır. Bu nedenle çim kesimi, görüntü işleme veya biçme mekanizmasına ilişkin işlemler bu akışın kapsamı dışında bırakılmıştır.

Haznede çim birikmeye başladıkça, hazne altında konumlandırılan ağırlık sensörü üzerinden yük ölçümü yapılmaktadır. “Ağırlık Sensörü / Yük Ölçümü” bloğunda elde edilen veriler hem hazne doluluğunun izlenmesinde hem de adaptif hız kontrol yapısının temel girdisi olarak kullanılmaktadır. Sensörden alınan ağırlık bilgisi, “Yük Ölçümü Denetimi” bloğunda değerlendirilerek hazne yükünün belirlenen sınır değere ulaşip ulaşmadığı kontrol edilmektedir.

Sistemde adaptif hız kontrolü, haznedeki yük değişimine bağlı olarak paletli hareket sisteminin hızının ayarlanması prensibine dayanmaktadır. Ağırlık sensöründen alınan yük bilgisi “Adaptif Hız Değerinin Belirlenmesi” bloğuna aktarılmakta ve bu veriye göre sistemin uygun ilerleme hızı belirlenmektedir. Belirlenen hız değeri “Hız Kontrolörü” tarafından işlenerek “Palet Motorlarına Hız Komutu” bloğuna iletilmektedir. Ardından palet motorları ve sürücüleri bu komut doğrultusunda çalışmaktadır.

Paletli hareket sisteminden alınan hız geri bildirimini “Hız Ölçümü” bloğu üzerinden tekrar hız kontrolörüne aktarılmaktadır. Böylece sistem yalnızca ağırlık verisine göre açık çevrimli bir hız değişimi yapmakla kalmamakta, aynı zamanda gerçek hız bilgisini de dikkate alan geri beslemeli bir kontrol yapısı oluşturmaktadır. Bu geri besleme sayesinde paletli sistemin yük artışına rağmen daha dengeli, kontrollü ve enerji verimli şekilde ilerlemesi hedeflenmektedir.

Hazne yükü sürekli olarak denetlenmekte ve akış şemasında karar bloğu olarak gösterilen “Hazne Yüğü 2.5 kg’a Ulaştı mı?” sorusu üzerinden değerlendirme yapılmaktadır. Eğer hazne yükü 2.5 kg seviyesine ulaşmamışsa sistem “Hayır” kolu üzerinden toplama döngüsüne geri dönmekte ve biçilen çimin vakumla toplanması, depolanması, ağırlık ölçümü ve adaptif hız kontrolü süreçleri devam etmektedir. Böylece sistem, hazne dolana kadar çalışma çevrimini kesintisiz biçimde sürdürmektedir.

Hazne yükü 2.5 kg eşik değerine ulaştığında sistem “Evet” kolu üzerinden boşaltma sürecine geçmektedir. Bu aşamada öncelikle “Sistemin Durdurulması” adımı uygulanmakta, yani paletli hareket ve toplama işlemi boşaltma sırasında durdurulmaktadır. Sistemin durdurulması, boşaltma işleminin daha kontrollü ve güvenli biçimde gerçekleştirilebilmesi açısından önemlidir. Bu nedenle akış şemasında bu adım, başlangıç ve durum geçişlerini ifade eden terminal biçimli bir yapı ile gösterilmiştir.

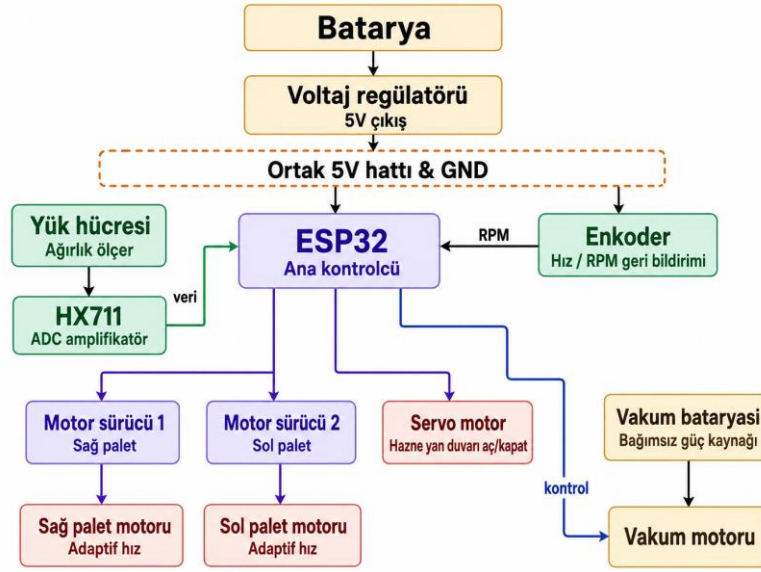
Sistem durdurulduktan sonra “Servo Motor ile Hazne Duvarının Açılması” adımı devreye girmektedir. Bu aşamada servo motor, haznenin açılır duvarını kontrollü şekilde hareket ettirmekte ve boşaltma işlemi için gerekli açıklığı oluşturmaktadır. Haznenin iç yüzeylerinin eğimli tasarlanması sayesinde, haznede biriken çim ek bir itici mekanizmaya ihtiyaç duyulmadan yerçekimi etkisiyle dışarı tahliye edilmektedir. Bu işlem akış şemasında “Çimin Boşaltılması” bloğu ile ifade edilmiştir.

Boşaltma işleminin ardından “Dara Kontrolü” gerçekleştirilmekte ve haznenin boş duruma döndüğü kontrol edilmektedir. Bu adım, sonraki çalışma döngüsünde ağırlık ölçümünün doğru şekilde sürdürülebilmesi için gereklidir. Dara kontrolünün tamamlanmasının ardından sistem tekrar başlangıç/toplama döngüsüne dönmekte ve aynı işlem sırası yeniden başlatılmaktadır. Böylece toplama, yük izleme, adaptif hız kontrolü ve otomatik boşaltma süreçleri kullanıcı müdahalesi gerektirmeden çevrimsel olarak yürütülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde akış şeması, sistemin sensör verisiyle desteklenen, yük değişimlerine duyarlı ve geri beslemeli bir çalışma yapısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Çim toplama ve depolama süreci yalnızca mekanik bir işlem olarak ele alınmamış; hazne ağırlığı, paletli sistemin ilerleme hızı, enerji tüketimi ve sistem davranışı gibi mühendislik parametreleriyle ilişkilendirilerek adaptif bir kontrol problemine dönüştürülmüştür. Akış şeması, sistemin tasarım felsefesini, karar mekanizmalarını ve yük değişimine bağlı adaptif hız kontrol yaklaşımını bütüncül biçimde yansıtan temel yapı taşlarından biri niteliğindedir.

3.2. Sistem Mimarisi

Sistem mimarisi; sensör katmanı, kontrol birimi, motor ve tahrik elemanları ile güç ve sürücü altyapısından oluşan bütünleşik bir mekatronik yapı olarak tasarlanmıştır. Mimari tasarımın temel amacı, hazneye çekilen çimin kütle değişimine bağlı olarak paletli sistemin ilerleme hızını dinamik şekilde uyarlayabilen, kararlı çalışan ve belirlenen doluluk seviyesinde otomatik boşaltma yapabilen bir toplama–depolama–boşaltma mekanizması ortaya koymaktır. Bu doğrultuda sistemde kullanılan her bileşen; yük izleme, enerji verimliliği, hareket kontrolü, mekanik boşaltma ve adaptif geri besleme gereksinimleri gözetilerek seçilmiştir.



Şekil 3.2.1. Paletli otonom toplama ve boşaltma sisteminin donanım ve kontrol mimarisi

Temeli oluşturan sensör sistemi; yük, hız, akım ve mekanik hareket gibi fiziksel büyüklüklerin izlenmesini sağlamaktadır. Hazne altında konumlanan yük hücresi, depolanan çimin kütlelerini doğrudan ölçmekte ve böylece hazne doluluğu ile boşaltma eşiği güvenilir bir fiziksel ölçüm üzerinden belirlenmektedir. Yük hücresinden elde edilen düşük seviyeli sinyal, HX711 yük amplifikatörü ile yükseltilmekte ve dijital forma dönüştürülerek mikrodenetleyiciye aktarılmaktadır. Bu yapı sayesinde kütle ölçümü yalnızca eşik algılama amacıyla değil, aynı zamanda adaptif hız kontrol mekanizmasının geri besleme parametresi olarak da kullanılmaktadır.

Paletli hareket sisteminde kullanılan artımlı optik döner enkoder ise hız bilgisinin ölçülmesini sağlayarak, motor komut değeri ile gerçek hareket davranışı arasındaki farkın izlenmesine olanak tanımaktadır. Böylece hız geri beslemesi, adaptif kontrol algoritmasının daha kararlı çalışmasına katkı sağlamaktadır.

Tüm sensör verileri, sistemin karar verme ve kontrol merkezini oluşturan ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyici tarafından işlenmektedir. Mikrodenetleyici; yük hücresi ve enkoderden gelen verileri birlikte değerlendirerek palet motorlarının sürücülerine uygun hız komutları üretmektedir. Kontrol yapısının temelini yük değişimine bağlı adaptif hız kontrol yaklaşımı oluşturmaktadır. Bu yapı ile sistem sabit hızda çalışmak yerine, hazne kütlesindeki artışa bağlı olarak ilerleme hızını dinamik biçimde ayarlamakta; böylece enerji tüketiminin azaltılması, hareket kararlılığının korunması ve mekanik zorlanmaların sınırlandırılması hedeflenmektedir.

Sistemin mekanik ve elektromekanik yapısı paletli hareket motorları, vakum motoru ve servo motorla çalışan hazne boşaltma mekanizmasından oluşmaktadır. Paletli hareket motorları prototipin ilerlemesini sağlarken, vakum motoru biçilen çimin süpürge başlığı ve hortum hattı üzerinden hazneye taşınmasında görev almaktadır. Bu kapsamda, önceki tasarımda yer alan 48 V BLDC santrifüj üfleyici motor yerine BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W süpürge motoru kullanılmaktadır. Çimin hazneye aktarılması için 35 mm çaplı hortum ve gövde altında paletlerin arasında sabitlenen süpürge başlığı tercih edilmiştir.

Otomatik boşaltma yapısı, hazne içerisindeki çim miktarının 2.5 kg eşik değerine ulaşması durumunda devreye girmektedir. Bu aşamada sistemin hareketi durdurulmakta ve servo motor aracılığıyla haznenin açılır duvarı kontrol edilmektedir. Haznenin dış yapısı dikdörtgen formda tasarlanmış olsa da iç yüzeylerinin eğimli olması sayesinde, hazne duvarı açıldığında biriken çim yerçekimi etkisiyle dışarı tahliye edilmektedir. Böylece lineer aktüatörlü alt kapak yerine daha sade, düşük maliyetli ve mekanik olarak daha pratik bir servo kontrollü yan duvar boşaltma yapısı kullanılmıştır.

Güç ve sürücü katmanı; batarya güç hattı, motor sürücü kartları, voltaj düşürücü regülatör, sensör beslemeleri ve kontrol elektroniğinden oluşmaktadır. Sistemde farklı gerilim seviyelerinde çalışan bileşenler bulunduğu için, motorlar, mikrodenetleyici, sensörler ve yardımcı elemanlar uygun gerilim seviyelerine regüle edilerek beslenmektedir. Prototip üzerinde mekanik yerleşim, elektronik bağlantılar, sensör entegrasyonu, vakum hattı, paletli hareket sistemi ve servo kontrollü boşaltma mekanizması bir araya getirilmiştir.

3.3. Hesaplamalar

3.3.1. Hazne Hacmi ve Çim Kapasitesi

Bu çalışma kapsamında kullanılan depolama haznesi, 30 × 30 × 20 cm boyutlarında tasarlanmıştır. Haznenin dış geometrisi dikdörtgen forma sahip olmakla birlikte, iç kısmında boşaltma işlemini kolaylaştırmak amacıyla eğimli bir plaka yapısına yer verilmiştir. Bu tasarım nedeniyle haznenin toplam geometrik hacmi ile çim depolama amacıyla kullanılacak etkin hacmi birbirinden farklılık göstermektedir.

Hazne genişliği: $X = 30 \text{ cm} = 0.30 \text{ m}$

Hazne derinliği: $Y = 30 \text{ cm} = 0.30 \text{ m}$

Hazne yüksekliği: $Z = 20 \text{ cm} = 0.20 \text{ m}$

Haznenin toplam hacmi: $V = X \times Y \times Z = 0.30 \times 0.30 \times 0.20 = 0.018 \text{ m}^3$

Eğimli plaka ölçüleri: $12 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$

Eğimli plakanın kapladığı hacim: $V_{\text{plaka}} = 0.12 \times 0.30 \times 0.30 / 2 = 0.0054 \text{ m}^3$

Kullanılabilir hazne hacmi: $V_{\text{kullanılabilir}} = V_{\text{toplam}} - V_{\text{plaka}}$
 $V_{\text{kullanılabilir}} = 0.018 - 0.0054 = 0.0126 \text{ m}^3 = 12.6 \text{ L}$

Haznenin toplam hacmi, genişlik, derinlik ve yükseklik değerleri kullanılarak 0.018 m^3 olarak hesaplanmıştır. Ancak iç kısımda yer alan eğimli plakanın kapladığı hacim bu değerden çıkarıldığında, çim depolama için kullanılabilir hacim 0.0126 m^3 olarak elde edilmiştir. Bu değer yaklaşık 12.6 litre hacme karşılık gelmektedir.

Maksimum depolanan çim kütlesi: $m_{\text{maksimum}} = 2.5 \text{ kg}$

Çimin ortalama hacimsel yoğunluğu: $\rho_{\text{çim}} = m_{\text{maksimum}} / V_{\text{kullanılabilir}}$
 $\rho_{\text{çim}} = 2.5 / 0.0126 = 198.4 \text{ kg/m}^3$

Sistem tasarımında haznenin maksimum 2.5 kg çim depolayacağı kabul edilmiştir. Bu kütlenin kullanılabilir hazne hacmi içerisinde depolandığı varsayılarak çimin ortalama hacimsel yoğunluğu hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucunda çimin ortalama hacimsel yoğunluğu yaklaşık 198.4 kg/m^3 olarak bulunmuştur. Bu sonuç, belirlenen hazne boyutlarının hedeflenen depolama kapasitesiyle uyumlu olduğunu göstermektedir.

Ayrıca hazne içerisinde kullanılan eğimli plaka yapısı, yalnızca hacim hesabını etkileyen bir unsur değil, aynı zamanda boşaltma davranışını iyileştiren önemli bir tasarım tercihidir. Bu sayede ek bir itici mekanizmaya ihtiyaç duyulmadan boşaltma işlemi daha basitleşerek düşük bakım gerektirir ve daha kontrollü olur.

3.3.2. Ağırlığa Bağlı Adaptif Hız Kontrol Modeli

Haznede depolanan çim miktarının artması, sistemin toplam kütlesinde ve ağırlık merkezi konumunda değişime neden olmaktadır. Bu durum, özellikle paletli hareket sistemine sahip prototiplerde ilerleme kararlılığını ve enerji tüketimini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle sistemin hareket hızının, haznede biriken yük miktarına bağlı olarak otomatik biçimde sınırlandırılması gerekli görülmüştür.

Bu kapsamda hazne altında konumlandırılan yük hücrelerinden elde edilen kütle bilgisi, adaptif hız kontrol algoritmasına giriş verisi olarak aktarılmaktadır. Hazne boş durumdayken sistemin daha yüksek ilerleme hızında çalışmasına izin verilmekte; haznedeki çim miktarı arttıkça izin verilen maksimum hız kontrollü biçimde azaltılmaktadır. Böylece yük artışıyla birlikte sistemin ani hız değişimlerinden veya dengesiz hareketlerden etkilenmesi önlenmektedir.

Hazne içerisindeki çim miktarı 2.5 kg eşik değerine ulaştığında robotun ilerleme hareketi durdurulmakta ve sistem otomatik boşaltma moduna geçmektedir. Bu yaklaşım sayesinde paletli hareket sisteminin aşırı zorlanması engellenmekte, prototipin daha dengeli ve güvenli bir hareket rejiminde çalışması sağlanmaktadır. Aynı zamanda enerji tüketimi, sistemin mevcut yük durumuna bağlı olarak düzenlenmekte ve gereksiz güç harcanmasının önüne geçilmektedir.

Bu nedenle geliştirilen adaptif hız modeli; yalnızca hareket performansını iyileştiren bir kontrol yaklaşımı değil, aynı zamanda sistem stabilitesi, enerji verimliliği ve mekanik zorlanmaların azaltılması açısından temel bir tasarım bileşeni olarak değerlendirilmiştir.

Hazne boşken maksimum hız: v_0

Haznedeki anlık depolanan çim kütlesi: m_b

Maksimum çim kütlesi 2.5 kg olduğundan haznedeki kütleyle bağlı izin verilen maksimum ilerleme hızı:

$$V_{maksimum}(m_b) = v_0 \left(1 - \frac{m_b}{m_{maksimum}} \right) = v_0 \left(1 - \frac{m_b}{2.5} \right)$$

3.3.3. Oluşan Tork ve Yük Dağılımı

Depolama haznesinin doluluk seviyesine ulaşması sonrasında çimin boşaltılması, haznenin açılır duvarı üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu mekanizmada açılacak duvarın hareketi, duvarın alt orta noktasına yerleştirilen servo motor ile sağlanmaktadır. Bu nedenle boşaltma aşaması, servo motorun hazne içerisindeki çim yüküne karşı duvarı kontrollü biçimde hareket ettirmesi gereken kritik çalışma durumlarından biri olarak değerlendirilmiştir.

Açılır duvar üzerinde oluşan yük etkisinin belirlenebilmesi için hazne içerisinde depolanan çimin ağırlık merkezi dikkate alınmıştır. Hazne duvarı 35 cm genişliğinde kabul edildiğinde, çim yükünün duvar yüzeyine yaklaşık olarak orta noktadan etki ettiği varsayılmıştır. Bu nedenle servo motorun etki noktası ile çim yükünün oluşturduğu moment etkisi arasındaki karakteristik mesafe yaklaşık olarak $35/2 = 17.5$ cm, yani 0.175 m olarak alınmıştır. Bu kabul, boşaltma sırasında servo motorun karşılaması gereken tork ihtiyacının yaklaşık olarak hesaplanmasına olanak sağlamaktadır.

Sistem için maksimum depolanan çim kütlesi 2.5 kg olarak belirlenmiştir. Yerçekimi ivmesi 9.81 m/s^2 kabul edildiğinde, hazne içerisinde biriken çimin oluşturduğu ağırlık kuvveti 24.525 N olarak hesaplanmaktadır. Mekanik tasarımda güvenli çalışma koşullarını sağlamak ve yük dağılımındaki olası dengesizlikleri dikkate almak amacıyla emniyet katsayısı 2 olarak alınmıştır. Bu katsayı, servo motor seçiminde yalnızca ideal yük koşullarının değil, çalışma sırasında oluşabilecek ek zorlanmaların da dikkate alınmasını sağlamaktadır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda açılır hazne duvarını hareket ettirmek için gerekli yaklaşık tork değeri 8.58 N·m olarak bulunmuştur. Bu değer, servo motorun seçimi ve bağlantı elemanlarının boyutlandırılması açısından temel bir tasarım parametresi olarak değerlendirilmiştir. Servo motorun açılır duvarın alt orta noktasına konumlandırılması sayesinde duvarın kontrollü şekilde açılması, hazne içindeki eğimli yüzeyler yardımıyla çimin yerçekimi etkisiyle tahliye edilmesi ve boşaltma işleminin sıkışma veya zorlanma olmadan gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir.

Servo motor konumu: Açılacak hazne duvarının alt orta noktası

Yük etkisinin yaklaşık uygulama uzaklığı: $35/2 = 17.5 \text{ cm} = 0.175 \text{ m}$

Emniyet katsayısı: 2

Ağırlık kuvveti: $F_{\beta} = m_{\text{maksimum}} \times g = 2.5 \times 9.81 = 24.525 \text{ N}$

Moment kolu: $l = 0.175 \text{ m}$

Servo motor için gerekli yaklaşık tork: $M = F_{\beta} \times l \times 2$

$M = 24.525 \times 0.175 \times 2 = 8.58 \text{ N}\cdot\text{m}$

3.3.4. Vakum Motoru Güç ve Tork Gereksinimi

Hazneye çim taşınması için kullanılan vakum motorunun güç ve tork gereksinimi; vakum hattı debisi, kanal basınç kaybı ve sistem verimi birlikte değerlendirilerek belirlenmiştir. Kanal içerisinde oluşan sürtünme, bağlantı noktalarındaki akış kayıpları ve türbülans etkileri dikkate alınarak hesaplanan güç değeri, motorun teorik çalışma gereksinimini ifade etmektedir.

Yapılan hesaplamada vakum hattı debisi 0.044 m³/s, kanal basınç kaybı 1500 Pa ve toplam sistem verimi 0.6 olarak alınmıştır. Bu değerlere göre gerekli teorik güç yaklaşık 110 W olarak hesaplanmıştır. Projede kullanılan BLDC-VKT4546 vakum motorunun çalışma gerilimi 11.1 V ve motor gücü 100 W olarak değerlendirilmiştir. Hesaplanan teorik güç değeri ile seçilen motor gücünün birbirine yakın olması, motorun sistem gereksinimlerine uygun olarak seçildiğini göstermektedir. Ancak gerçek çalışma koşullarında çimin nemli olması, hortum içinde birikme veya ani yük değişimleri gibi etkiler motor performansını etkileyebileceğinden, bu durumların deneysel testler sırasında ayrıca değerlendirilmesi gerekmektedir.

Motorun tork gereksinimi, motor gücü ve açısal hız ilişkisi kullanılarak hesaplanmıştır. Motor devri yaklaşık 7000 rpm kabul edildiğinde açısal hız yaklaşık 733 rad/s olarak bulunmuştur. Bu değer kullanılarak yapılan hesaplamada vakum motorunun yaklaşık tork değeri 0.14 N·m olarak elde edilmiştir. Bu tork değeri, vakum motorunun çimi hortum hattı üzerinden hazneye taşıyabilmesi için gerekli mekanik güç aktarımının değerlendirilmesinde temel bir parametre olarak kullanılmıştır.

Vakum hattının debisi: $Q = 0.044 \text{ m}^3/\text{s}$

Toplam verim: $\eta = 0.6$

Kanal basınç kaybı: $\Delta p = 1500 \text{ Pa} = 1.5 \text{ kPa}$

Gerekli teorik güç: $P = (\Delta p \times Q) / \eta = (1500 \times 0.044) / 0.6 \approx 110 \text{ W}$

Seçilen motor: BLDC-VKT4546

Çalışma gerilimi: 11.1 V

Motor gücü: $P_{\text{motor}} = 100 \text{ W}$

Motor devri: $n = 7000 \text{ rpm}$

Açısal hız: $\omega = (2 \times \pi \times n) / 60 = (2 \times \pi \times 7000) / 60 \approx 733 \text{ rad/s}$

Yaklaşık tork gereksinimi: $T = P / \omega = 100 / 733 \approx 0.14 \text{ N}\cdot\text{m}$

3.4. Komponentler

3.4.1. ESP32-S3-N16R8 Mikrokontrolcü (MCU)

ESP32-S3-N16R8, sistemin temel kontrol birimi olarak görev yapmaktadır. Projede sensörlerden alınan verilerin işlenmesi, motor sürücülerine gerekli kontrol sinyallerinin gönderilmesi, ağırlığa bağlı adaptif hız kontrol algoritmasının yürütülmesi ve kullanıcı komutlarının sisteme aktarılması ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle mikrodenetleyici, sistemin karar verme ve kontrol merkezini oluşturmaktadır.

Hazne altında konumlandırılan yük hücresinden elde edilen ağırlık verisi, HX711 modülü aracılığıyla ESP32'ye aktarılmaktadır. Mikrodenetleyici bu veriyi kullanarak haznedeki çim miktarını takip etmekte, boş hazne için alınan dara değerini referans kabul ederek net yük hesabı yapmaktadır. Hazne doluluk seviyesi belirlenen eşik değere ulaştığında sistemin toplama ve ilerleme hareketini durdurması, ardından boşaltma sürecine geçmesi yine ESP32 tarafından kontrol edilmektedir. Aynı zamanda paletli hareket sisteminin kontrolünde de kullanılmaktadır. Motor sürücü kartlarına gönderilen PWM sinyalleri ile palet motorlarının hızları ayarlanmakta, enkoderden alınan geri bildirimler ile motor hareketi izlenmektedir. Böylece sistemin manuel veya otomatik modda çalışması sağlanmakta, haznedeki yük miktarına bağlı olarak ilerleme hızı otomatik şekilde sınırlandırılmaktadır. Bu yapı, robotun yük artışına rağmen dengeli ve kontrollü hareket etmesini sağlamaktadır.

Bu mikrodenetleyicinin projede tercih edilmesinin önemli nedenlerinden biri de dahili Wi-Fi haberleşme özelliğine sahip olmasıdır. ESP32'nin Wi-Fi modülü kullanılarak sisteme ait bir web tabanlı kontrol arayüzü geliştirilmiştir. Bu arayüz üzerinden kullanıcı, aynı ağ bağlantısı üzerinden sisteme erişerek hazne doluluk değerini, yük hücresinden okunan ağırlık bilgisini, motor PWM değerini ve enkoder verisini anlık olarak takip edebilmektedir. Ayrıca dara alma, sıfırlama, durdurma, ileri-geri hareket komutları ve manuel/adaptif kontrol seçimi gibi temel sistem komutları da web arayüzü üzerinden gönderilebilmektedir.

Genel olarak ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi; sensör verilerinin toplanması, motor kontrol sinyallerinin üretilmesi, adaptif hız algoritmasının uygulanması ve Wi-Fi tabanlı web arayüzü üzerinden kullanıcı ile sistem arasındaki haberleşmenin sağlanması görevlerini üstlenmektedir.



Şekil 3.4.1. ESP32-S3-N16R8 MCU

3.4.2. Motor Sürücü Kartları

Projede paletli hareket sisteminin kontrolü için 2 adet motor sürücü kartı kullanılmıştır. Motor sürücü kartları, ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisinden gelen kontrol sinyallerini motorların çalışmasını sağlayacak uygun güç seviyelerine dönüştürmektedir. Bu sayede mikrodenetleyici doğrudan yüksek akım çeken motorları beslemek yerine, yalnızca kontrol sinyali üretmekte; motorların ileri, geri, durma ve hız kontrol işlemleri motor sürücü kartları üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Kullanılan motor sürücü kartlarının çalışma gerilimi 5–28 V/DC, çalışma akımı ise 40 A değerindedir. Bu özellikler, palet motorlarının ihtiyaç duyduğu akım ve gerilim gereksinimlerinin karşılanmasına olanak sağlamaktadır. Paletli sistemde sağ ve sol motorların ayrı ayrı kontrol edilebilmesi için iki motor sürücü kartı kullanılması tercih edilmiştir. Böylece robotun ileri–geri hareketi, dönüş manevraları ve hız ayarlamaları daha kontrollü biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

Motor sürücü kartları, ESP32'den gelen PWM sinyalleri aracılığıyla motor hızını ayarlamaktadır. PWM sinyalinin görev oranı değiştirilerek motorlara uygulanan etkin gerilim kontrol edilmekte ve buna bağlı olarak paletlerin dönüş hızı düzenlenmektedir. Bu yapı, hem manuel kontrol modunda kullanıcının web arayüzü üzerinden hız ayarı yapmasını hem de adaptif kontrol modunda hazne ağırlığına göre sistem hızının otomatik olarak değiştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Sistemde yük arttıkça paletli yapının daha dengeli hareket edebilmesi için motor sürücü kartları adaptif hız kontrol algoritmasının uygulayıcı elemanları olarak görev yapmaktadır. Hazne altında bulunan yük hücresinden elde edilen ağırlık bilgisi ESP32 tarafından işlenmekte ve hesaplanan uygun hız komutu motor sürücülerine iletilmektedir. Bu sayede robotun hareket hızı, haznede biriken çim miktarına göre dinamik olarak ayarlanabilmektedir.

Genel olarak motor sürücü kartları; palet motorlarının güç kontrolünü sağlamak, ESP32 ile motorlar arasında güvenli bir arayüz oluşturmak, PWM tabanlı hız kontrolünü gerçekleştirmek ve robotun yön–hareket komutlarını uygulamak amacıyla sistem mimarisinde önemli bir görev üstlenmektedir.



Şekil 3.4.2. Motor Sürücü Kartı

3.4.3. Ağırlık Sensör Seti

Projede hazne içerisinde biriken çim miktarının ölçülmesi için 20 kg kapasiteli ağırlık sensör seti kullanılmıştır. Bu set, ağırlık sensörü ve HX711 yük hücresi yükseltici modülünden oluşmaktadır. Ağırlık sensörü, hazne altına yerleştirilerek haznede biriken çimin oluşturduğu yükü algılamakta; HX711 modülü ise sensörden gelen düşük seviyeli analog sinyali yükselterek mikrodenetleyicinin işleyebileceği dijital veriye dönüştürmektedir.

Bu ölçüm sistemi sayesinde haznenin doluluk durumu gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir. Sistem çalışmaya başlamadan önce boş haznenin darası alınmakta ve bu değer referans kabul edilmektedir. Böylece ölçülen toplam ağırlıktan haznenin kendi ağırlığı çıkarılarak yalnızca haznede depolanan net çim miktarı hesaplanmaktadır.

Ağırlık sensöründen elde edilen veri, projenin otomatik boşaltma ve adaptif hız kontrol işlevleri açısından kritik öneme sahiptir. Haznedeki çim miktarı arttıkça ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi bu veriyi değerlendirerek paletli hareket sisteminin hızını yük durumuna göre düzenlemektedir. Hazne içerisindeki çim ağırlığı 2.5 kg eşik değerine ulaştığında ise sistem ilerleme hareketini durdurmakta ve servo motor kontrollü boşaltma sürecini başlatmaktadır.

Sensör setinin 20 kg kapasiteye sahip olması, sistemde hedeflenen 2.5 kg çim depolama sınırının güvenli bir ölçüm aralığı içerisinde kalmasını sağlamaktadır. Bu sayede sensör, maksimum çalışma yükünün oldukça üzerinde bir kapasiteyle kullanılarak aşırı yüklenme riskine karşı güvenli bir ölçüm altyapısı sunmaktadır.

Genel olarak 20 kg ağırlık sensör seti; hazne doluluğunun belirlenmesi, boş hazne darasının alınması, net çim ağırlığının hesaplanması, adaptif hız kontrol algoritmasına veri sağlanması ve otomatik boşaltma kararının verilmesi için sistemin temel algılama bileşenlerinden biri olarak görev yapmaktadır.



Şekil 3.4.3. Ağırlık Sensörü ve HX711

3.4.4. Artımlı Optik Döner Enkoder

Projede paletli hareket sisteminin hız geri bildirimini alınması için artımlı optik döner enkoder kullanılmıştır. Enkoder, motor milinin veya hareket aktarım elemanının dönme hareketini algılayarak belirli aralıklarla darbe sinyalleri üretmektedir. Bu darbeler mikrodenetleyici tarafından sayılarak motorun dönüş hızı ve hareket durumu hakkında bilgi elde edilmektedir.

Kullanılan enkoderin çalışma gerilimi 5–24 V/DC, darbe sayısı ise 400 darbe olarak belirtilmiştir. Bu özellik, palet motorlarının hareketinin yeterli hassasiyetle izlenmesine olanak sağlamaktadır. Enkoderden alınan darbe bilgisi sayesinde motorlara gönderilen hız komutu ile gerçek hareket hızı karşılaştırılabilmekte ve sistemin kontrol doğruluğu artırılmaktadır.

Artımlı enkoderden elde edilen hız verisi, adaptif hız kontrol algoritmasının geri besleme bileşenlerinden biridir. Hazne içerisindeki çim miktarı arttıkça ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi, yük hücresinden gelen ağırlık bilgisiyle birlikte enkoderden alınan hız bilgisini değerlendirerek paletli hareket sisteminin hızını düzenlemektedir. Böylece sistem, yalnızca teorik hız komutuna göre değil, gerçek hareket verisine göre de kontrol edilebilmektedir.

Enkoder kullanımı, özellikle yük artışı, zemin direnci veya paletlerde oluşabilecek kayma gibi durumlarda motor hızının izlenmesini sağlamaktadır. Bu sayede robotun ilerleme hareketi daha kararlı hâle getirilmekte, hız sapmaları tespit edilebilmekte ve kontrol algoritmasının gerektiğinde düzeltici komutlar üretmesi mümkün olmaktadır.

Genel olarak artımlı optik döner enkoder; palet motorlarının dönüş hareketini izlemek, hız geri bildirimini sağlamak, adaptif hız kontrol algoritmasının doğruluğunu artırmak ve sistemin daha dengeli bir hareket yapısına sahip olmasına katkı sağlamak amacıyla kullanılan önemli bir sensör bileşenidir.



Şekil 3.4.4. Artımlı Optik Döner Enkoder

3.4.5. BLDC-VKT4546 Vakum Motoru

Projede biçilen çimin hazneye taşınması için BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W vakum motoru kullanılmıştır. Bu motor, gövde altında paletlerin arasında sabit konumlandırılan süpürge başlığı ve 35 mm çapındaki hortum hattı ile birlikte çalışarak biçilmiş çimin vakum etkisiyle hazne içerisine aktarılmasını sağlamaktadır.

Vakum motoru, sistemin çim toplama işlevini gerçekleştiren ana bileşenlerden biridir. Motor çalıştırıldığında süpürge başlığı üzerinde emiş etkisi oluşturmakta ve zeminde bulunan biçilmiş çimi hortum hattı boyunca hazneye taşımaktadır. Bu sayede sistem, çimi kesme işlemi gerçekleştirilmeden yalnızca daha önce biçilmiş olan çimi toplama ve depolama görevini yerine getirmektedir.

Kullanılan BLDC yapısı, fırçasız motor teknolojisine sahip olması nedeniyle daha verimli, daha uzun ömürlü ve bakım ihtiyacı daha düşük bir çalışma karakteristiği sunmaktadır. 11.1 V DC çalışma gerilimi ve 100 W güç değeri, prototip ölçeğinde gerekli emiş kuvvetinin sağlanması için uygun bir motor seçimi olarak değerlendirilmiştir. Motorun güç gereksinimi, vakum hattı debisi, kanal basınç kaybı ve sistem verimi dikkate alınarak yapılan hesaplamalarla değerlendirilmiştir.

Vakum motorunun çalışması ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi üzerinden kontrol edilmektedir. Sistem komutlarına bağlı olarak motorun çalıştırılması, durdurulması ve toplama sürecinin yönetilmesi sağlanmaktadır. Hazne 2.5 kg eşik değerine ulaştığında sistemin ilerleme hareketi ve vakumla toplama işlemi durdurulmakta, ardından servo motor destekli otomatik boşaltma süreci başlatılmaktadır.

Genel olarak BLDC-VKT4546 vakum motoru; biçilmiş çimin süpürge başlığı ve hortum hattı aracılığıyla hazneye taşınmasını sağlamak, toplama işleminin sürekliliğini desteklemek ve prototipin vakum destekli çim toplama fonksiyonunu gerçekleştirmek amacıyla sistemde kullanılan temel motor bileşenidir.



Şekil 3.4.5. BLDC-VKT4546 Vakum Motoru

3.4.6. DC Motorlar

Projede paletli hareket sisteminin tahrik edilmesi için 2 adet DC motor kullanılmıştır. Bu motorlar, robotun sağ ve sol paletlerinin hareketini sağlayarak sistemin ileri-geri hareket etmesine ve yön değiştirmesine olanak tanımaktadır. Her bir motor ayrı bir motor sürücü kartı üzerinden kontrol edilmekte, böylece paletlerin hızı ve dönüş yönü bağımsız olarak ayarlanabilmektedir.

Kullanılan DC motorların çalışma gerilimi 12–24 V, çalışma akımı ise 0.5 A olarak belirtilmiştir. Bu özellikler, prototipin paletli hareket yapısı için gerekli tahrik gücünü sağlayacak şekilde değerlendirilmiştir. Motorlar, palet mekanizmasına mekanik olarak bağlı çalışarak robotun zemin üzerinde dengeli biçimde ilerlemesini sağlamaktadır.

DC motorların kontrolü, ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisinden motor sürücü kartlarına gönderilen PWM ve yön sinyalleri aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. PWM sinyalinin görev oranı değiştirilerek motorların hızları ayarlanmakta, yön sinyalleri ile ileri ve geri hareket komutları uygulanmaktadır. Bu yapı sayesinde robot hem manuel modda kullanıcı komutlarıyla hem de adaptif modda sistem tarafından belirlenen hız değerleriyle hareket edebilmektedir.

Adaptif hız kontrol yapısında DC motorlar, haznede biriken çim miktarına göre belirlenen ilerleme hızını uygulayan temel tahrik elemanlarıdır. Hazne yükü arttıkça mikrodenetleyici tarafından hesaplanan hız değeri motor sürücülerine iletilmekte ve paletli hareket sisteminin hızı kontrollü biçimde azaltılmaktadır. Böylece robotun yük artışına rağmen daha kararlı, dengeli ve enerji verimli şekilde çalışması hedeflenmektedir.

Genel olarak DC motorlar; paletli sistemin hareketini sağlamak, robotun yön ve hız kontrolünü gerçekleştirmek, adaptif hız algoritmasının uygulama çıktısını fiziksel harekete dönüştürmek ve prototipin saha üzerinde hareket edebilmesini mümkün kılmak amacıyla sistemde kullanılan temel tahrik bileşenleridir.



Şekil 3.4.6. DC Motorlar

3.4.7. DS3218MG 20 kg Dijital Servo Motor

Projede otomatik boşaltma mekanizmasının çalıştırılması için DS3218MG 20 kg dijital servo motor kullanılmıştır. Servo motor, hazne içerisindeki çim yükü belirlenen eşik değere ulaştığında hazne kapağının kontrollü biçimde açılmasını sağlamaktadır. Bu sayede biriken çimin kullanıcı müdahalesi olmadan tahliye edilmesi ve sistemin otonom çalışma kabiliyetinin artırılması hedeflenmiştir.

DS3218MG servo motor, açılır hazne kapağına bağlı olacak şekilde konumlandırılmıştır. Sistem toplama modunda çalışırken kapak kapalı konumda tutulmakta; yük hücresinden alınan ağırlık verisi 2.5 kg seviyesine ulaştığında ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi tarafından servo motora açılma komutu gönderilmektedir. Servo motorun hareketiyle kapak açılmakta ve haznedeki çim yerçekimi etkisiyle dışarı boşaltılmaktadır. Boşaltma işlemi tamamlandıktan sonra servo motor kapağı tekrar kapalı konuma getirir.

Kullanılan DS3218MG servo motor 4.8–6.8 V çalışma gerilimi aralığına ve 180° dönüş açısına sahiptir. 5 V besleme geriliminde yaklaşık 19 kg·cm, 6.8 V besleme geriliminde ise yaklaşık 21.5 kg·cm durma torku sağlayabilmektedir. Bu yüksek tork kapasitesi, kapak ağırlığı, sürtünme ve çim birikimi gibi dirençlerin aşılmasında avantaj sağlamaktadır.

Servo motor ESP32-S3-N16R8 tarafından üretilen kontrol sinyali ile sürülmektedir. Yüksek akım ihtiyacı nedeniyle servo motorun harici 5–6 V regülatör üzerinden beslenmesi, servo motor ve mikrodenetleyici toprak hatlarının ise ortaklanması gerekmektedir. Genel olarak DS3218MG servo motor, otomatik boşaltma mekanizmasının güçlü, kontrollü ve tekrarlanabilir şekilde çalışmasını sağlayan temel hareket elemanlarından biridir.



Şekil 3.4.7. MG995 Servo Motor

3.4.8. NX-Buck3A Fixed Düşürücü Voltaj Regülatörü

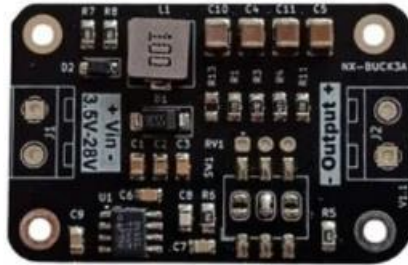
Projede farklı gerilim seviyelerinde çalışan elektronik bileşenlerin güvenli ve kararlı şekilde beslenebilmesi için NX-Buck3A Fixed düşürücü voltaj regülatörü kullanılmıştır. Bu regülatör, batarya veya ana güç hattından gelen daha yüksek gerilimi sistemde ihtiyaç duyulan 3.3 V, 5 V veya 12 V seviyelerine düşürerek kontrol kartı, sensörler ve yardımcı devre elemanları için uygun besleme gerilimi sağlamaktadır.

Sistemde ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyici, HX711 modülü, ağırlık sensörü, enkoder, servo motor ve diğer elektronik bileşenler farklı çalışma gerilimlerine ihtiyaç duyabilmektedir. Bu nedenle güç dağıtımının doğrudan tek bir besleme hattı üzerinden yapılması uygun değildir. NX-Buck3A regülatörü, ilgili bileşenlerin gereksinim duyduğu sabit gerilim seviyesini sağlayarak sistemin kararlı çalışmasına katkıda bulunmaktadır.

Regülatörün 3 A akım kapasitesine sahip olması, düşük ve orta güç tüketimli elektronik bileşenlerin beslenmesi için yeterli bir çalışma aralığı sunmaktadır. Bu yapı sayesinde özellikle mikrodenetleyici ve sensör katmanında ani gerilim dalgalanmalarının önüne geçilmesi, ölçüm verilerinin daha güvenilir alınması ve kontrol sinyallerinin kararlı biçimde üretilmesi hedeflenmiştir.

Düşürücü voltaj regülatörü, sistemin güç altyapısında batarya ile kontrol elektroniği arasında bir ara katman görevi üstlenmektedir. Böylece yüksek gerilimli besleme hattının doğrudan hassas elektronik bileşenlere uygulanması engellenmekte ve her bileşenin kendi çalışma gerilimine uygun şekilde beslenmesi sağlanmaktadır.

Genel olarak NX-Buck3A Fixed düşürücü voltaj regülatörü; sistemdeki farklı gerilim gereksinimlerini karşılamak, kontrol kartı ve sensörlerin güvenli beslenmesini sağlamak, güç dağıtımını düzenlemek ve elektronik bileşenlerin kararlı çalışmasına katkıda bulunmak amacıyla kullanılan temel güç düzenleme elemanlarından biridir.



Şekil 3.4.8. NX- Buck3A Voltaj Regülatörü

3.4.9. 3 Seri 3 Paralel Lityum-İyon PİL Grubu

Projede sistemin enerji ihtiyacını karşılamak amacıyla 3 seri 3 paralel bağlantılı lityum-iyon pil grubu kullanılmıştır. Bu yapı toplamda 9 adet 3.7 V lityum-iyon pilin bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Pil grubu, sistemde yer alan motorlar, kontrol kartı, sensörler ve yardımcı elektronik bileşenler için ana enerji kaynağı olarak görev yapmaktadır.

Pil bağlantısında 3 seri bağlantı ile gerilim seviyesi artırılmakta, 3 paralel bağlantı ile ise akım kapasitesi ve çalışma süresi desteklenmektedir. Her bir lityum-iyon pilin nominal gerilimi 3.7 V olduğundan, 3 adet pilin seri bağlanmasıyla pil grubunun nominal gerilimi yaklaşık 11.1 V olmaktadır. Bu değer, projede kullanılan BLDC-VKT4546 DC 11.1 V, 100 W vakum motorunun çalışma gerilimiyle uyumludur.

Paralel bağlantı sayesinde pil grubunun sağlayabileceği toplam kapasite artırılmakta ve sistemin daha uzun süre çalışabilmesi hedeflenmektedir. Bu yapı, özellikle vakum motoru ve paletli hareket sisteminin çalışma sırasında ihtiyaç duyduğu enerjinin karşılanması açısından önemlidir. Aynı zamanda sistemde yer alan düşürücü voltaj regülatörleri aracılığıyla bu batarya gerilimi, ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyici, sensörler, enkoder, servo motor ve diğer elektronik bileşenlerin ihtiyaç duyduğu uygun gerilim seviyelerine indirilmektedir.

Pil grubu, sistemin taşınabilir ve kablosuz çalışabilmesi açısından temel güç bileşenidir. Prototip üzerinde sistem bağlantıları tamamlanmış olmakla birlikte, mevcut durumda batarya kaynaklı çalışma problemi nedeniyle bütünleşik sistem testleri tam olarak gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle sonraki aşamada pil grubunun çalışma kararlılığının sağlanması, bağlantıların kontrol edilmesi ve sistemin yük altında test edilmesi planlanmaktadır.

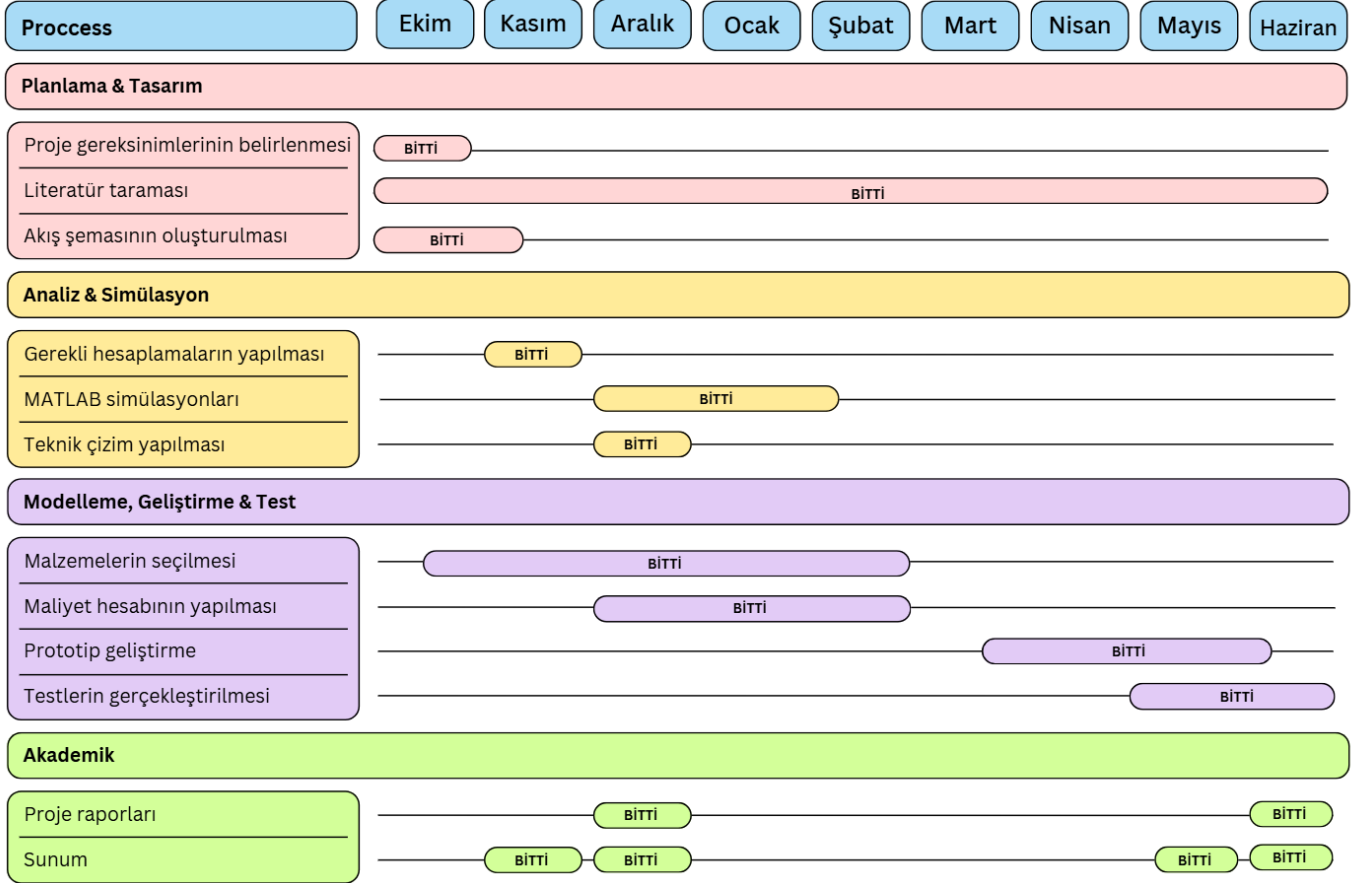
Genel olarak 3 seri 3 paralel lityum-iyon pil grubu; sisteme ana besleme gerilimini sağlamak, vakum motoru ve hareket motorlarının enerji ihtiyacını karşılamak, regülatörler aracılığıyla kontrol elektroniğinin beslenmesini desteklemek ve prototipin bağımsız şekilde çalışmasına olanak tanımak amacıyla kullanılan temel enerji kaynağıdır.



Şekil 3.4.9. 3.7 V Lityum-İyon PİL

3.5. Gantt Şeması

Proje çalışma takvimi, Ekim–Haziran ayları arasındaki süreçte yürütülen planlama, tasarım, analiz, geliştirme, test ve akademik çıktı faaliyetlerini gösterecek şekilde hazırlanmıştır. Gantt şemasında proje faaliyetleri dört ana başlık altında ele alınmıştır: Planlama ve Tasarım, Analiz ve Simülasyon, Modelleme, Geliştirme ve Test ile Akademik Çalışmalar. Bu yapı sayesinde projenin hem teknik geliştirme süreci hem de raporlama ve sunum gibi akademik çıktıları zaman ekseninde izlenebilir hâle getirilmiştir.



Şekil 3.5. Gantt Şeması

Projenin ilk aşamasında, Planlama ve Tasarım başlığı altında sistem gereksinimleri belirlenmiş ve projenin temel çalışma prensibi oluşturulmuştur. Bu kapsamda çim toplama, depolama, yük ölçümü, adaptif hız kontrolü ve otomatik boşaltma işlevlerine yönelik ihtiyaçlar değerlendirilmiştir. Ekim ayında proje gereksinimlerinin belirlenmesi ve akış şemasının oluşturulması tamamlanmıştır. Literatür taraması ise Kasım ayında başlatılmış ve Şubat ayına kadar devam eden bir süreç olarak yürütülmüştür. Bu aşama sonunda sistemin çalışma mantığı, temel kontrol adımları ve tasarım yaklaşımı netleştirilmiştir.

Analiz ve Simülasyon aşamasında, sistemin mühendislik hesaplamaları ve benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerekli hesaplamalar Kasım ayında tamamlanmış, MATLAB simülasyonları Aralık ve Ocak aylarında yürütülmüştür. Bu kapsamda hazne kapasitesi, yük hücresi tabanlı ağırlık ölçümü, adaptif hız kontrol modeli, servo motor tork gereksinimi ve vakum motoru çalışma prensibine yönelik değerlendirmeler yapılmıştır. Teknik çizimler de Aralık ayında tamamlanarak prototip geliştirme süreci için gerekli sayısal ve görsel tasarım verileri elde edilmiştir.

Modelleme, Geliştirme ve Test aşaması kapsamında, sistemde kullanılacak malzemeler seçilmiş ve maliyet hesabı tamamlanmıştır. Malzeme seçimi Kasım ayından Şubat ayına kadar devam etmiş, maliyet hesabı ise Aralık–Şubat döneminde gerçekleştirilmiştir. Prototip geliştirme faaliyetleri Mart ve Mayıs ayları arasında yürütülmüştür. Bu süreçte paletli hareket sistemi, vakumla çim toplama hattı, hazne, yük hücresi sistemi, motor sürücüleri, ESP32-S3-N16R8 kontrol kartı, web tabanlı kontrol arayüzü, röle kontrollü vakum sistemi ve DS3218MG 20 kg dijital servo motor destekli otomatik boşaltma mekanizması bir araya getirilmiştir. Mekanik ve elektronik bağlantılar tamamlanarak sistem bütünlüklü bir prototip yapısı içerisinde çalışır hâle getirilmiştir.

Test süreci Mayıs ve Haziran aylarında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yük hücresinden elde edilen ağırlık verileri doğrulanmış, web arayüzü üzerinden sistem kontrolü test edilmiş ve palet motorlarının manuel/adaptif çalışma davranışları incelenmiştir. Vakum motorunun kademeli çalışma yapısı röle üzerinden kontrol edilmiş; web arayüzündeki vakum aç komutu ile sistemin gecikmeli ve kademeli olarak çalışması, vakum kapat komutu ile durması değerlendirilmiştir. Servo motor ile hazne kapağının açılıp kapanma hareketi test edilmiş ve hazne yükünün 2,5 kg seviyesine ulaşması durumunda sistemin boşaltma moduna geçmesi hedeflenmiştir. Böylece prototipin temel mekanik, elektronik ve yazılımsal işlevleri bütünlüklü olarak doğrulanmıştır.

Akademik çalışmalar kapsamında proje raporları ve sunum hazırlıkları süreç boyunca düzenli olarak yürütülmüştür. Proje raporlarına ilişkin çalışmalar Aralık ayında ve Haziran ayında tamamlanacak aşamalar hâlinde planlanmıştır. Sunum hazırlıkları ise Kasım, Aralık, Mayıs ve Haziran dönemlerinde gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, proje kapsamında planlama, tasarım, literatür taraması, mühendislik hesaplamaları, simülasyon, teknik çizim, malzeme seçimi, maliyet analizi, prototip geliştirme, sistem entegrasyonu, test ve akademik çıktıların hazırlanması aşamaları planlı bir takvim doğrultusunda yürütülmüştür. Gantt şeması, projenin Ekim ayında başlayan planlama sürecinden Haziran ayında tamamlanması öngörülen nihai rapor ve sunum aşamalarına kadar sistematik biçimde ilerlediğini göstermektedir. Sonuç olarak geliştirilen prototipin yük değişimine bağlı adaptif hız kontrolü, çim toplama, kademeli vakum kontrolü ve otomatik boşaltma işlevlerini yerine getirebilecek şekilde tasarlandığı ve bütünlüklü sistem yapısının oluşturulduğu ortaya konmuştur.

4. SİMÜLASYONLAR VE TEKNİK ÇİZİM

4.1. MATLAB Simülasyonları

4.1.1. Adaptif Hız Grafikleri

```
clear; close all; clc;

sim_time = 400;
dt = 0.05;
t = 0:dt:sim_time;

L = 0.30;
W = 0.30;

H_top = 0.20;
H_left = 0.12;
H_right = 0.00;

H_fill_max = 0.20;

V_total = L * W * H_top;
V_plate = L * W * (H_left - H_right) / 2;
V_usable = V_total - V_plate;

max_grass_load = 2.5;
rho_grass = max_grass_load / V_usable;

v_nom = 1.20;
rpm_nom = 4000;
rpm_max = 5200;
rpm_compensation = 850;

motor_tau = 0.45;

loadcell_noise_std = 0.025;
loadcell_drift = 0.00015;
rpm_noise_std = 5;

servo_rpm_max = 60;
servo_open_time = 3.0;
empty_hold_time = 5.0;
servo_close_time = 3.0;
empty_duration = servo_open_time + empty_hold_time + servo_close_time;

servo_max_angle = 180;

grass_load_true = zeros(size(t));
grass_load_est = zeros(size(t));
grass_load_raw = zeros(size(t));

fill_volume = zeros(size(t));
fill_height = zeros(size(t));
```

```

rpm_true = zeros(size(t));
rpm_cmd = zeros(size(t));
rpm_filt = zeros(size(t));

travel_speed = zeros(size(t));

servo_rpm = zeros(size(t));
servo_angle = zeros(size(t));

rpm_true(1) = rpm_nom;
rpm_cmd(1) = rpm_nom;
rpm_filt(1) = rpm_nom;
travel_speed(1) = v_nom;

emptying = false;
empty_timer = 0;

height_from_volume = @(V) ...
    (V <= W*L*H_left/2) .* sqrt((2 * H_left .* V) ./ (W * L)) + ...
    (V > W*L*H_left/2) .* (V ./ (W * L) + H_left/2);

for k = 2:length(t)

    if ~emptying

        if mod(t(k), 160) < 50
            volume_in_rate = 6.0e-5;
        elseif mod(t(k), 160) < 100
            volume_in_rate = 8.0e-5;
        else
            volume_in_rate = 5.5e-5;
        end

        fill_volume(k) = fill_volume(k-1) + volume_in_rate * dt;
        fill_volume(k) = min(fill_volume(k), V_usable);

        fill_height(k) = height_from_volume(fill_volume(k));
        fill_height(k) = min(fill_height(k), H_fill_max);

        grass_load_true(k) = rho_grass * fill_volume(k);
        grass_load_true(k) = min(grass_load_true(k), max_grass_load);

    else

        empty_timer = empty_timer + dt;

        if empty_timer <= servo_open_time

            servo_rpm(k) = servo_rpm_max;
            servo_angle(k) = servo_max_angle * (empty_timer /
servo_open_time);

            grass_load_true(k) = grass_load_true(k-1);
            fill_volume(k) = fill_volume(k-1);

        elseif empty_timer <= servo_open_time + empty_hold_time

```

```

servo_rpm(k) = 0;
servo_angle(k) = servo_max_angle;

grass_load_true(k) = grass_load_true(k-1) * exp(-4.0 * dt);
fill_volume(k) = grass_load_true(k) / rho_grass;

elseif empty_timer <= empty_duration

servo_rpm(k) = -servo_rpm_max;

close_timer = empty_timer - servo_open_time - empty_hold_time;
servo_angle(k) = servo_max_angle * (1 - close_timer /
servo_close_time);

grass_load_true(k) = grass_load_true(k-1) * exp(-4.0 * dt);
fill_volume(k) = grass_load_true(k) / rho_grass;

else

emptying = false;
empty_timer = 0;

grass_load_true(k) = 0;
grass_load_est(k) = 0;
grass_load_raw(k) = 0;
fill_volume(k) = 0;
fill_height(k) = 0;

servo_rpm(k) = 0;
servo_angle(k) = 0;
end

fill_height(k) = height_from_volume(fill_volume(k));
fill_height(k) = max(0, min(fill_height(k), H_fill_max));
end

if grass_load_true(k) >= max_grass_load && ~emptying
emptying = true;
empty_timer = 0;
end

grass_load_raw(k) = grass_load_true(k) + randn * loadcell_noise_std +
loadcell_drift * t(k);

if emptying
alpha_load = 0.30;
else
alpha_load = 0.12;
end

grass_load_est(k) = (1 - alpha_load) * grass_load_est(k-1) + alpha_load *
grass_load_raw(k);
grass_load_est(k) = max(0, min(max_grass_load, grass_load_est(k)));

if emptying
travel_speed(k) = 0;
rpm_cmd(k) = 0;

```

```

else
    travel_speed(k) = v_nom;
    load_ratio = grass_load_est(k) / max_grass_load;
    rpm_cmd(k) = rpm_nom + rpm_compensation * load_ratio;
    rpm_cmd(k) = min(rpm_cmd(k), rpm_max);
end

if emptying
    rpm_target = 0;
else
    rpm_target = rpm_cmd(k);
end

rpm_true(k) = rpm_true(k-1) + ...
    (rpm_target - rpm_true(k-1)) * (dt / (motor_tau + dt));

rpm_meas = rpm_true(k) + randn * rpm_noise_std;
rpm_filt(k) = 0.85 * rpm_filt(k-1) + 0.15 * rpm_meas;

end

fontSizeTitle = 18;
fontSizeLabel = 16;
fontSizeAxis = 14;
fontSizeLegend = 13;
lineWidthMain = 2.2;
lineWidthSecondary = 1.8;

figure('Color','w','Position',[100 50 1200 1000]);

subplot(5,1,1);
plot(t, grass_load_true, 'k', 'LineWidth', lineWidthMain); hold on;
plot(t, grass_load_est, 'r--', 'LineWidth', lineWidthSecondary);
yline(max_grass_load, 'b:', '2.5 kg eşik', ...
    'LineWidth', 1.6, ...
    'FontSize', fontSizeLegend, ...
    'LabelHorizontalAlignment', 'left');
ylabel('Yük (kg)', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight', 'bold');
title('Gerçek ve Tahmini Yük', 'FontSize', fontSizeTitle, 'FontWeight',
'bold');
legend('Gerçek Yük', 'Tahmini Yük', 'Location', 'best', 'FontSize',
fontSizeLegend);
grid on;
ylim([0 2.8]);
set(gca, 'FontSize', fontSizeAxis, 'LineWidth', 1.2);

subplot(5,1,2);
plot(t, fill_height, 'Color', [0.2 0.5 0.9], 'LineWidth', lineWidthMain);
ylabel('Dolum Yüksekliği (m)', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight',
'bold');
title('Eğimli Hazne Geometrisine Göre Dolum Yüksekliği', 'FontSize',
fontSizeTitle, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
ylim([0 H_fill_max + 0.02]);
set(gca, 'FontSize', fontSizeAxis, 'LineWidth', 1.2);

subplot(5,1,3);

```

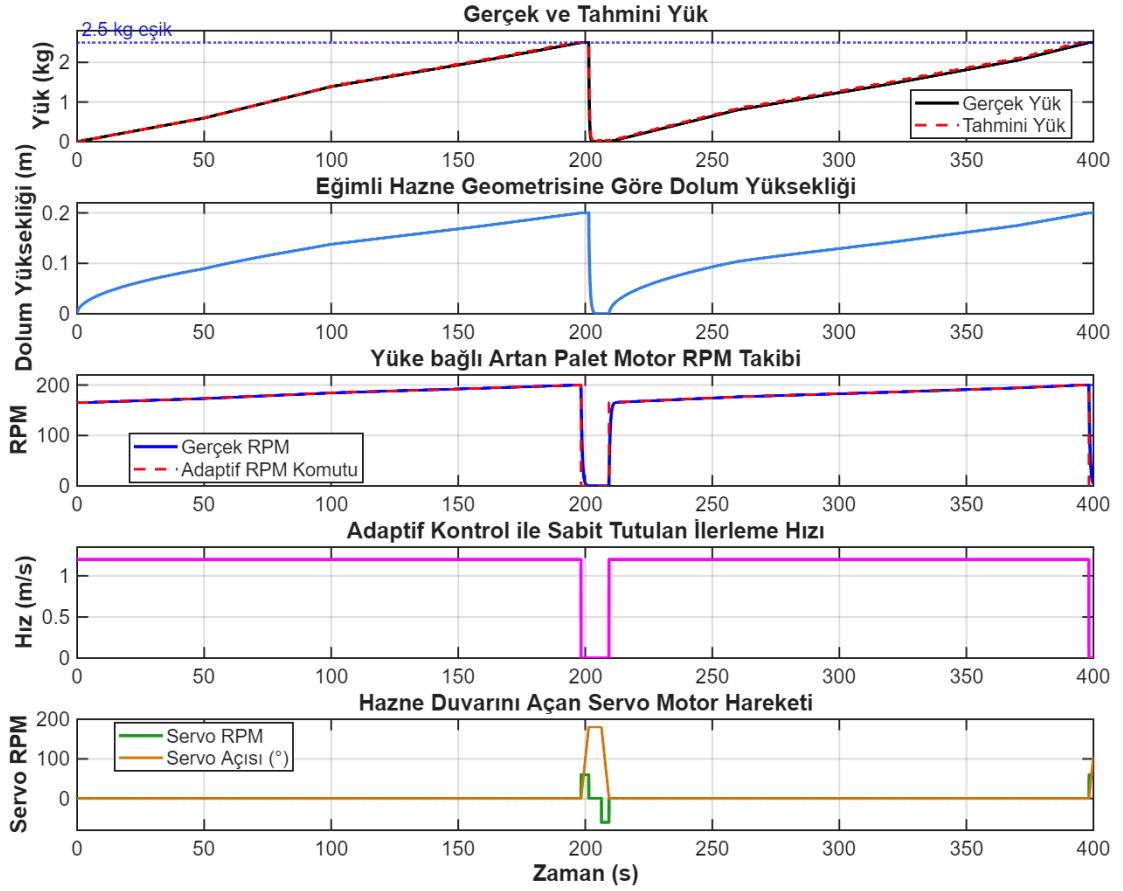
```

plot(t, rpm_true * (200 / max(rpm_true)), 'b', 'LineWidth', lineWidthMain);
hold on;
plot(t, rpm_cmd * (200 / max(rpm_cmd)), 'r--', 'LineWidth',
lineWidthSecondary);
ylabel('RPM', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight', 'bold');
title('Yüke bağlı Artan Palet Motor RPM Takibi', 'FontSize', fontSizeTitle,
'FontWeight', 'bold');
legend('Gerçek RPM', 'Adaptif RPM Komutu', 'Location', 'best', 'FontSize',
fontSizeLegend);
grid on;
ylim([0 220]);
set(gca, 'FontSize', fontSizeAxis, 'LineWidth', 1.2);

subplot(5,1,4);
plot(t, travel_speed, 'm', 'LineWidth', lineWidthMain);
ylabel('Hız (m/s)', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight', 'bold');
title('Adaptif Kontrol ile Sabit Tutulan İlerleme Hızı', 'FontSize',
fontSizeTitle, 'FontWeight', 'bold');
grid on;
ylim([0 v_nom + 0.15]);
set(gca, 'FontSize', fontSizeAxis, 'LineWidth', 1.2);

subplot(5,1,5);
plot(t, servo_rpm, 'Color', [0.1 0.6 0.1], 'LineWidth', lineWidthMain); hold
on;
plot(t, servo_angle, 'Color', [0.85 0.45 0.0], 'LineWidth',
lineWidthSecondary);
ylabel('Servo RPM', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight', 'bold');
xlabel('Zaman (s)', 'FontSize', fontSizeLabel, 'FontWeight', 'bold');
title('Hazne Duvarını Açan Servo Motor Hareketi', 'FontSize', fontSizeTitle,
'FontWeight', 'bold');
legend('Servo RPM', 'Servo Açısı (°)', 'Location', 'best', 'FontSize',
fontSizeLegend);
grid on;
ylim([-servo_rpm_max-20 servo_max_angle+20]);
set(gca, 'FontSize', fontSizeAxis, 'LineWidth', 1.2);

```



Şekil 4.1.1.1. Yük Durumuna göre RPM ve Adaptif Hız Kontrollü İlerleme Hızı ve Boşaltmayı Gerçekleştiren Servo Motor Hareketi Grafikleri

Gerçekleştirilen MATLAB simülasyonu ile hazne dolum süreci, ağırlık sensörü tabanlı yük tahmini, palet motorlarının adaptif RPM kontrolü, sabit ilerleme hızı ve servo motor destekli otomatik boşaltma mekanizması birlikte incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, sistemin hazne doluluğuna bağlı olarak çalışma durumunu değiştirdiğini ve 2.5 kg eşik değerine ulaşıldığında boşaltma moduna geçtiğini göstermektedir.

İlk grafikte gerçek yük ve tahmini yük değişimi verilmiştir. Hazne içerisindeki çim miktarı zamanla artmakta ve yaklaşık 200. saniye civarında 2.5 kg eşik değerine ulaşmaktadır. Tahmini yük eğrisi, yük hücresinden alınan ölçüm verisini temsil edecek şekilde gerçek yükü küçük sapmalarla takip etmektedir. Bu durum, ağırlık sensöründen elde edilen verinin filtreleme işlemi sonrasında gerçek yük değişimini başarılı şekilde izleyebildiğini göstermektedir. Yük 2.5 kg seviyesine ulaştığında sistem boşaltma moduna geçmekte ve haznedeki yük hızlı biçimde azalmaktadır. Boşaltma tamamlandıktan sonra sistem yeniden toplama döngüsüne başlamakta ve yük tekrar artmaya devam etmektedir.

İkinci grafikte, eğimli hazne geometrisine bağlı olarak dolun yüksekliği değişimi görölmektedir. Haznenin iç kısmında eğimli plaka bulunduğundan, dolun yüksekliği doğrusal olmayan bir artış göstermektedir. Başlangıçta çim, eğimli yüzeyin oluşturduğu hacmi doldurduğu için dolun yüksekliği daha belirgin bir eğimle artmakta; hazne doldukça yükseklik maksimum dolun seviyesine yaklaşmaktadır. Boşaltma anında dolun yüksekliği ani olarak düşmekte, ardından yeni çevrimde tekrar artmaya başlamaktadır. Bu sonuç, hazne iç geometrisinin dolun davranışı üzerindeki etkisinin simölasyona yansıtıldığını göstermektedir.

Üçüncü grafikte palet motorlarının RPM takibi verilmiştir. Haznedeki yük arttıķa sistemin normal şartlarda yavaşlama eğilimi göstermesi beklenmektedir. Ancak adaptif hız kontrol yapısı, bu yük artışını telafi etmek amacıyla palet motorlarına gönderilen RPM komutunu artırmaktadır. Grafikte adaptif RPM komutunun yükle birlikte kademeli olarak yükseldiği, gerçek RPM değerinin ise bu komutu takip ettiği görölmektedir. Bu durum, kontrol algoritmasının artan yük koşullarına karşı motor hızını düzenleyerek ilerleme performansını korumaya çalıştığını göstermektedir. Hazne 2.5 kg seviyesine ulaştığında sistem durdurulduğu için hem komut RPM'i hem de gerçek RPM sifıra düşmektedir.

Dördüncü grafikte adaptif kontrol ile sabit tutulan ilerleme hızı gösterilmiştir. Simölasyon boyunca sistem, toplama modunda yaklaşık sabit bir ilerleme hızında çalışmaktadır. Haznedeki yük artsa bile adaptif RPM kontrolü sayesinde ilerleme hızında belirgin bir düşüş meydana gelmemektedir. Bu sonuç, ağırlığa bağlı adaptif hız kontrolünün temel amacına uygun olarak, yük artışına rağmen hareket hızının korunabildiğini göstermektedir. Boşaltma moduna geçildiğinde ise sistemin güvenli biçimde durması gerektiğinden ilerleme hızı sifıra düşmektedir. Boşaltma işlemi tamamlandıktan sonra sistem tekrar sabit ilerleme hızında çalışmaya devam etmektedir.

Beřinci grafikte hazne duvarını ačan servo motorun hareketi incelenmiştir. Hazne yükü 2.5 kg eřik değerine ulaştığında servo motor devreye girmekte ve hazne duvarını 180° açacak şekilde hareket etmektedir. Servo motorun açılma hareketi sırasında servo RPM değerinde pozitif bir değişim, kapanma hareketi sırasında ise negatif yönde bir değişim görölmektedir. Hazne duvarı açık konumdayken servo açısı sabit kalmakta ve bu süreçte çimin boşaltılması gerçekteştirilmektedir. Bořaltma tamamlandıktan sonra servo motor hazne duvarını tekrar kapalı konuma getirerek sistemi yeni toplama döngüsüne hazır hâle getirmektedir.

Genel olarak simölasyon sonuçları, sistemin hazne doluluğunu sensör verisiyle takip edebildiğini, eğimli hazne geometrisinin dolun davranışına etkisini modelleyebildiğini, yük artışına karşı palet motor RPM komutunu adaptif olarak artırarak ilerleme hızını sabit tutabildiğini ve 2.5 kg eşik değerine ulaşıldığında otomatik boşaltma çevrimini başlatabildiğini göstermektedir. Bu yönüyle simölasyon, geliştirilen sistemin temel çalışma mantığını ve kontrol algoritmasının beklenen davranışını doğrulayan önemli bir ön değerlendirme niteliğindedir.

4.1.2. PID Kontrol Grafikleri

```
clear; clc; close all;

dt = 0.001;
t_end = 3;
t = 0:dt:t_end;
N = length(t);

J = 0.02;
B = 0.1;
Kt = 1.2;

Kp = 2;
Ki = 10;
Kd = 0.01;

w = zeros(1,N);
u = zeros(1,N);
e = zeros(1,N);

int_e = 0;
prev_e = 0;

ref = ones(1,N);

m_max = 2.5;
m = m_max * (t/t_end);

k_m = 0.8;
T_load = k_m * m;

T_dist = zeros(1,N);

for k = 1:N

    grass_density = 0.1 * sin(2*pi*0.4*t(k));

    vibration = 0.03 * sin(2*pi*8*t(k));

    terrain = 0.05 * sin(2*pi*0.1*t(k));

    noise = 0.01 * randn;

    T_dist(k) = grass_density + vibration + terrain + noise;
end

for k = 1:N-1

    e(k) = ref(k) - w(k);

    int_e = int_e + e(k)*dt;
    der_e = (e(k) - prev_e)/dt;

    u(k) = Kp*e(k) + Ki*int_e + Kd*der_e;
    u(k) = max(min(u(k),2.5), -2.5);
```

```

T_motor = Kt * u(k);

dw = (1/J)*(T_motor - T_load(k) - T_dist(k) - B*w(k));

w(k+1) = w(k) + dw*dt;

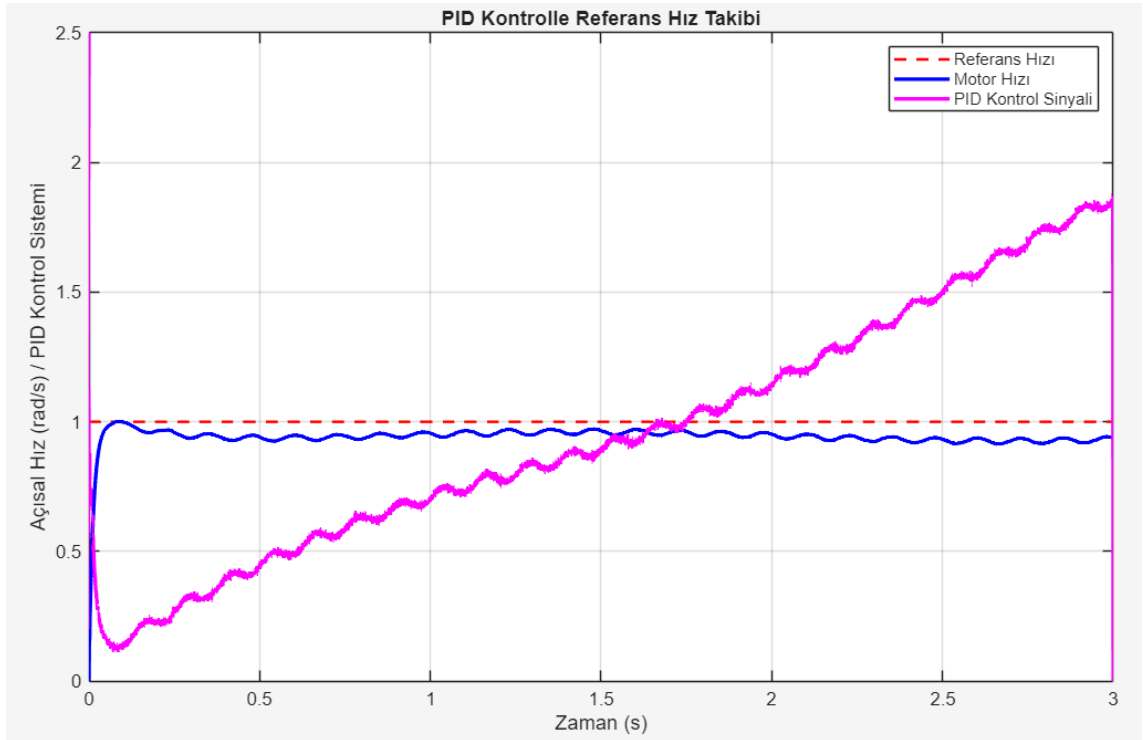
prev_e = e(k);
end

e(end) = ref(end) - w(end);

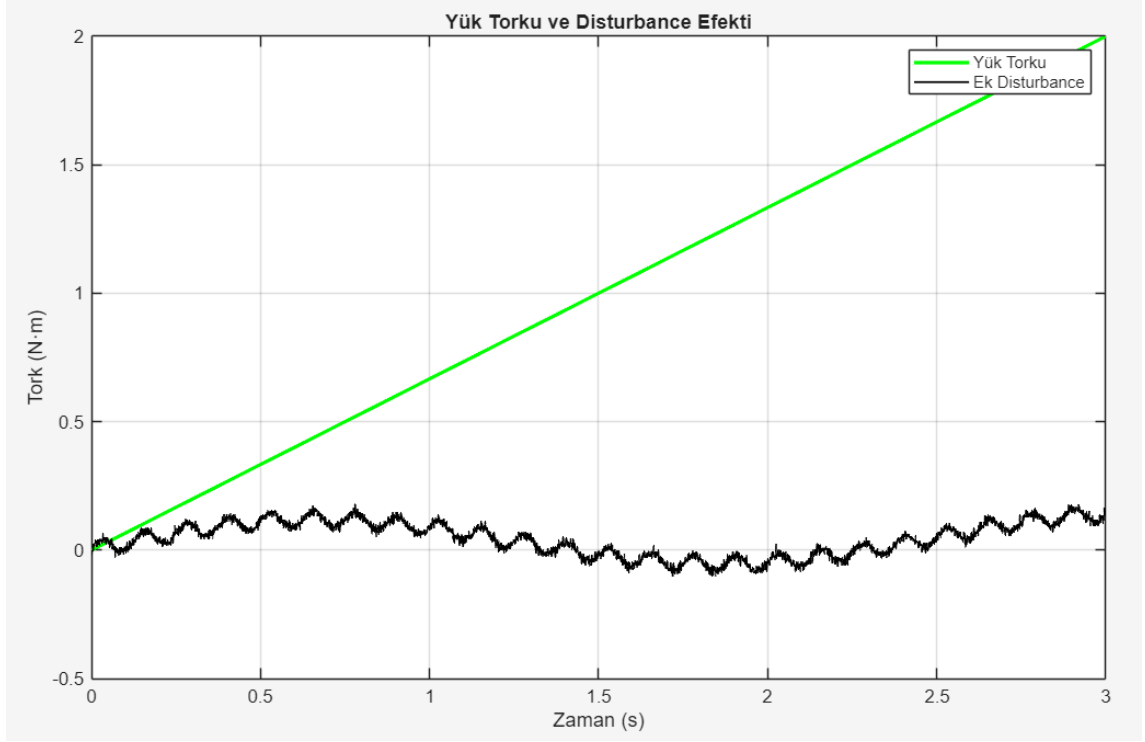
figure;
plot(t, ref, '--r','LineWidth',1.5); hold on;
plot(t, w, 'b','LineWidth',2);
plot(t, u,'m','LineWidth',2);
grid on;
title("PID Kontrolle Referans Hız Takibi");
xlabel("Zaman (s)");
ylabel("Açısal Hız (rad/s) / PID Kontrol Sistemi");
legend("Referans Hızı","Motor Hızı", "PID Kontrol Sinyali");

figure;
plot(t, T_load,'g','LineWidth',2); hold on;
plot(t, T_dist,'k','LineWidth',1);
grid on;
title("Yük Torku ve Disturbance Efektleri");
xlabel("Zaman (s)");
ylabel("Tork (N·m)");
legend("Yük Torku","Ek Disturbance");

```



Şekil 4.1.2.1. PID Kontrol ile Referans Hız Takibi Grafiği



Şekil 4.1.2.2. Yük Torku ve Bozucu Etkiler Grafiği

Bu MATLAB kodunun temel amacı, değişken yük ve bozucu etkiler altında çalışan bir motor sisteminin PID kontrol yöntemi ile referans açısal hızı takip etme başarımını incelemektir. Simülasyonda motorun dinamik davranışı; atalet momenti, viskoz sürtünme katsayısı ve motor tork katsayısı dikkate alınarak modellenmiştir. Sistem için referans hız değeri 1 rad/s olarak belirlenmiş ve motor hızının bu referans değeri ne ölçüde takip edebildiği analiz edilmiştir.

Kodda PID kontrolcü; oransal, integral ve türevsel kontrol bileşenlerinden oluşacak şekilde tanımlanmıştır. Kontrolcü, referans hız ile motor hızı arasındaki hatayı sürekli olarak hesaplamakta ve bu hataya bağlı olarak motoru sürecekt kontrol sinyalini üretmektedir. Ayrıca kontrol sinyali $\pm 2,5$ aralığında sınırlandırılarak sistemin fiziksel çalışma sınırları simülasyona dâhil edilmiştir. Bu sayede motorun gerçekçi bir çalışma koşulunda nasıl tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Simülasyonda yük momenti, hazneye dolan çim miktarının zamanla artmasını temsil edecek biçimde modellenmiştir. Maksimum 2,5 kg çim yüküne karşılık gelen yük momenti zamanla doğrusal olarak artırılmıştır. Bunun yanında sistem üzerine etki eden ek bozucular da modele eklenmiştir. Bu bozucular; çim yoğunluğundaki değişimler, mekanik titreşimler, zemin etkileri ve sensör/ortam kaynaklı rastgele gürültü bileşenlerinden oluşmaktadır. Böylece sistemin yalnızca ideal koşullarda değil, gerçek çalışma şartlarına daha yakın bir senaryo altında da değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Birinci grafikte (Şekil 4.1.2.1.), PID kontrollü motor sisteminin referans hız takibi gösterilmektedir. Grafikte kırmızı kesikli çizgi 1 rad/s değerindeki referans hızı, mavi çizgi motorun açısal hızını, pembe çizgi ise PID kontrol sinyalini ifade etmektedir. Simülasyonun başlangıcında motor hızı sıfırdan başlayarak kısa sürede referans hıza yaklaşmıştır. Bu durum, PID kontrolcünün başlangıç hatasına hızlı bir şekilde tepki verdiğini ve motoru istenen çalışma hızına ulaştırabildiğini göstermektedir.

Motor hızı, referans değere ulaştıktan sonra küçük dalgalanmalarla birlikte yaklaşık 1 rad/s seviyesine yakın seyretmiştir. Bu dalgalanmalar, sisteme eklenen yük momenti ve bozucu etkilerden kaynaklanmaktadır. Özellikle yükün zamanla artması ve çim yoğunluğu, titreşim, zemin etkisi ile gürültü gibi dış bozucular motor hızında küçük salınımlara neden olmuştur. Buna rağmen motor hızının referans değerden büyük ölçüde kopmaması, PID kontrolcünün bozucu etkilere karşı belirli düzeyde kararlı bir hız takibi sağlayabildiğini göstermektedir.

Grafikte PID kontrol sinyalinin zamanla artış eğilimi gösterdiği görülmektedir. Simülasyon boyunca haznedeki çim yükünün artmasıyla birlikte motora etki eden yük momenti artar. Yük momenti büyüdükçe motorun referans hızı koruyabilmesi için daha yüksek kontrol sinyaline ihtiyaç duyulmuştur. PID kontrolcü bu artan yükü dengelemek amacıyla kontrol çıkışını artırmış ve sistemin referans hıza yakın çalışmasını sağlamıştır. Bu durum, geliştirilen kontrol yapısının değişken yük koşullarına uyum sağlayabildiğini göstermektedir.

İkinci grafikte (Şekil 4.1.2.1.), sisteme etki eden yük momenti ve ek bozucu etkiler zamana bağlı olarak gösterilmektedir. Yeşil çizgi yük momentini, siyah çizgi ise ek bozucu moment bileşenlerini temsil etmektedir. Yük momentinin zamanla doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Bu artış, depolama haznesinde biriken çim miktarının zaman içinde maksimum 2,5 kg seviyesine ulaşmasını temsil etmektedir. Dolayısıyla bu grafik, sistemin yük değişimine bağlı olarak giderek daha zorlayıcı bir çalışma koşuluna maruz kaldığını göstermektedir.

Ek bozucu etkiler ise çim yoğunluğu değişimi, mekanik titreşim, zemin etkisi ve rastgele gürültü bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. Siyah çizgide görülen salınımlı yapı, bu bozucuların zamanla değişken karakterde olduğunu göstermektedir. Düşük frekanslı değişimler çim yoğunluğu ve zemin etkisini temsil ederken, daha hızlı salınımlar titreşim etkisinden kaynaklanmaktadır. Rastgele gürültü bileşeni ise grafikteki düzensiz küçük değişimlerin oluşmasına neden olmuştur.

Grafik genel olarak değerlendirildiğinde, yük momentinin sistem üzerindeki baskın etki olduğu, bozucu momentlerin ise daha küçük genlikli fakat sürekli değişen ek etkiler oluşturduğu görülmektedir. Bu durum, motor kontrol sisteminin yalnızca artan yüke değil, aynı zamanda çevresel ve mekanik bozuculara karşı da dayanıklı olması gerektiğini ortaya koymaktadır. Simülasyon sonuçları, PID kontrolcünün bu değişken koşullar altında motor hızını referans değere yakın tutabildiğini göstermektedir.

4.1.3. Haznenin Dolumuna göre Ağırlık Merkezi Simülasyon ve Grafikleri

```
clear; clc; close all;

L = 0.30;
W = 0.30;

H_top = 0.20;
H_left = 0.12;
H_right = 0;

H_fill_max = 0.20;

m_hazne = 2;
rho_cim = 102;

doluluk = linspace(0,1,100);

CoM_yukseklk = zeros(size(doluluk));
toplam_agirlik = zeros(size(doluluk));

nx = 60; ny = 60;
x = linspace(0,L,nx);
y = linspace(0,W,ny);
[X,Y] = meshgrid(x,y);

Z_taban = H_left - (H_left - H_right)*(X/L);

dA = (L/(nx-1))*(W/(ny-1));

figure('Color','w'); hold on;
xlabel('X (m)'); ylabel('Y (m)'); zlabel('Z (m)');
title('Sol 0.12 → Sağ 0.08 Eğimli Taban');
axis([0 L 0 W 0 H_top]);
grid on;
view(45,30);

for i = 1:length(doluluk)

    dol = doluluk(i);
    h_level = dol * H_fill_max;
    Z_cim = max(0, h_level - Z_taban);
    V = sum(Z_cim(:)) * dA;

    if V == 0
        m_cim = 0;
        z_cm_cim = 0;
    else
        m_cim = rho_cim * V;

        z_local = Z_taban + Z_cim/2;
        z_cm_cim = sum(sum(z_local .* Z_cim)) * dA / V;
    end

    toplam_agirlik(i) = m_hazne + m_cim;
end
```

```

z_hazne = (H_top + H_left + H_right)/3;

CoM_yukseklk(i) = (m_hazne*z_hazne + m_cim*z_cm_cim) /
toplam_agirlik(i);

surf(X,Y,Z_taban,'FaceAlpha',0.3,'EdgeColor','k');
surf(X,Y,Z_taban +
Z_cim,'FaceColor','g','FaceAlpha',0.6,'EdgeColor','none');

plot3(L/2,W/2,CoM_yukseklk(i),'ro','MarkerSize',8,'MarkerFaceColor','r');

drawnow;
pause(0.05);

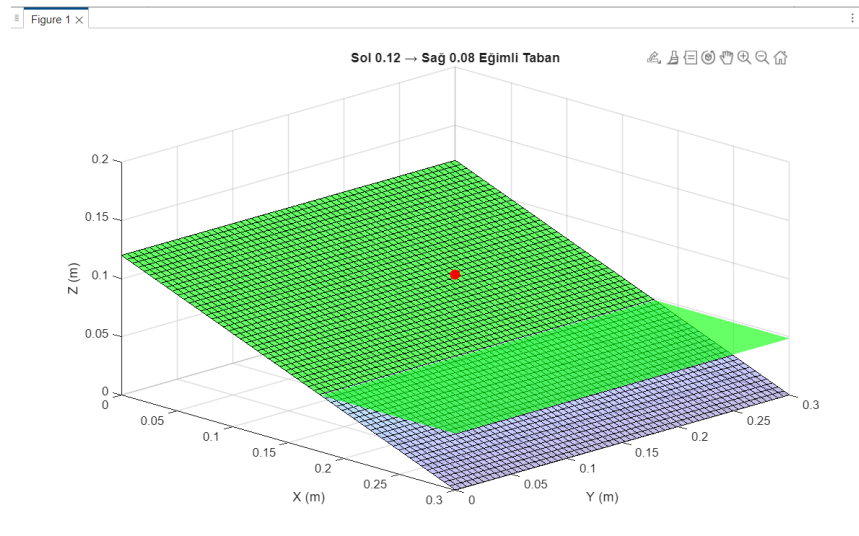
if i < length(doluluk)
    cla;
end
end

figure;

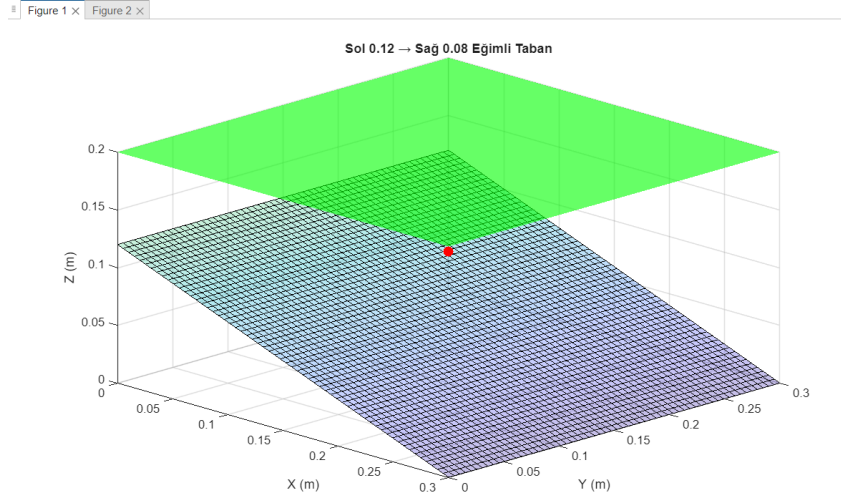
subplot(2,1,1);
plot(doluluk*100, toplam_agirlik,'LineWidth',2);
xlabel('Doluluk (%)');
ylabel('Toplam Kütle');
grid on;

subplot(2,1,2);
plot(doluluk*100, CoM_yukseklk,'LineWidth',2);
xlabel('Doluluk (%)');
ylabel('Ağırlık Merkezi');
grid on;

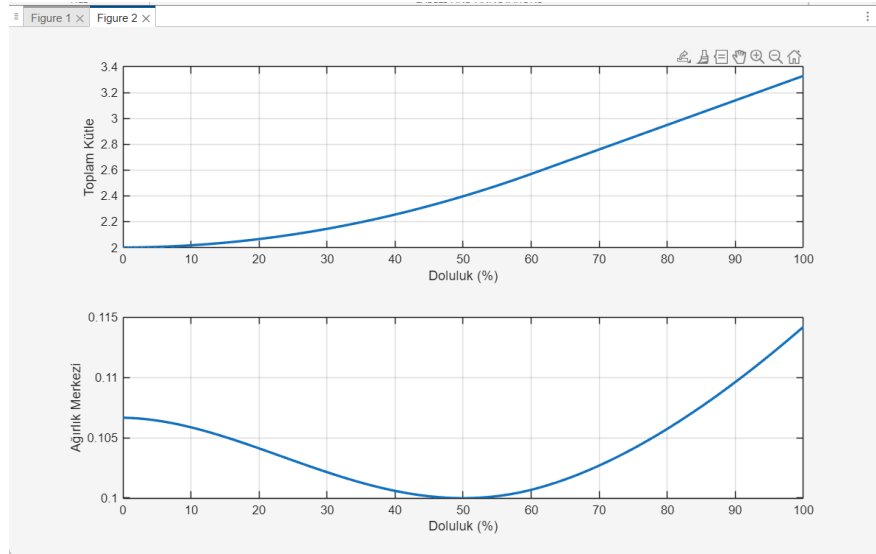
```



Şekil 4.1.3.1. Eğimli Hazne Duvarında yükselen Çim ve Ağırlık Merkezi Simülasyonu



Şekil 4.1.3.2. Eğimli Hazne Duvarında yükselen Çim ve Ağırlık Merkezi Simülasyonu



Şekil 4.1.3.2. Ağırlık Merkezi Değişiklikleri Grafikleri

Bu simülasyonda, depolama haznesinin iç geometrisinde yer alan eğimli tabanın dolum davranışı ve sistemin ağırlık merkezi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hazne boyutları 30 × 30 × 20 cm olarak tanımlanmış, hazne tabanının bir tarafında 0.12 m yüksekliğe sahip eğimli yüzey bulunduğu kabul edilmiştir. Bu eğimli taban yapısı, hazne içerisindeki çimin boşaltma sırasında yerçekimi etkisiyle dışarı doğru yönlendirilmesini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır.

Simülasyonda hazne doluluğu %0'dan %100'e kadar kademeli olarak artırılmış ve her doluluk oranında çimin hazne içerisinde kapladığı hacim hesaplanmıştır. Çimin yoğunluğu sabit kabul edilerek, her doluluk seviyesinde hazneye eklenen çim kütlesi belirlenmiştir. Böylece yalnızca haznenin kendi kütlesi değil, doluluk oranına bağlı olarak artan çim kütlesi de toplam sistem kütlesine dahil edilmiştir.

Üç boyutlu görselleştirme kısmında, eğimli taban yüzeyi ve doluluk seviyesine bağlı olarak hazne içerisinde biriken çim hacmi birlikte gösterilmektedir. Yeşil yüzey, belirli bir doluluk oranında hazne içerisinde bulunan çim miktarını temsil ederken; kırmızı nokta, hazne ve çim kütlesinin birlikte oluşturduğu anlık ağırlık merkezi konumunu göstermektedir. Doluluk oranı arttıkça çim hacminin yükseldiği ve buna bağlı olarak ağırlık merkezi konumunun da değiştiği gözlemlenmektedir.

Simülasyonun ilk çıktısı, doluluk oranına bağlı olarak toplam kütlenin değişimini göstermektedir. Hazne boş durumdayken toplam kütle yalnızca hazne kütlesinden oluşmakta, doluluk oranı arttıkça çim kütlesinin eklenmesiyle toplam kütle artmaktadır. Bu sonuç, yük hücresi ile ölçülen toplam ağırlığın hazne doluluğunu temsil edebileceğini ve doluluk arttıkça sistemin mekanik yükünün yükseldiğini göstermektedir.

İkinci çıktı ise doluluk oranına bağlı olarak ağırlık merkezi yüksekliğinin değişimini göstermektedir. Hazne içerisinde çim miktarı arttıkça, çimin hacimsel dağılımına bağlı olarak ağırlık merkezi konumu değişmektedir. Eğimli taban geometrisi nedeniyle dolum başlangıcında çim, tabanın düşük seviyeli bölgelerinde birikmekte; doluluk arttıkça kütle dağılımı hazne içerisinde daha yüksek noktalara taşınmaktadır. Bu nedenle ağırlık merkezi yüksekliği doluluk oranına bağlı olarak değişken bir davranış göstermektedir.

Genel olarak bu simülasyon, hazne iç geometrisinin yalnızca depolama hacmini değil, aynı zamanda sistemin ağırlık merkezi davranışını da etkilediğini göstermektedir. Ağırlık merkezindeki değişim, paletli robotun hareket kararlılığı, devrilme eğilimi ve yük altında kontrol performansı açısından önemli bir tasarım parametresidir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar, hazne geometrisinin mekanik denge ve boşaltma davranışı açısından değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır.

4.1.4. Filtreleme Grafikleri

```
clear; clc; close all;

t = 0:0.1:60;
m_max = 2.5;
m_true = linspace(0,m_max,length(t));

noise_std = 0.15;
noise = noise_std * randn(size(t));

m_meas = m_true + noise;
m_meas(m_meas < 0) = 0;

N = 10;
m_filt = movmean(m_meas,N);

figure("Name","Yük Hücresi Simülasyonu","NumberTitle","off");

subplot(3,1,1);
plot(t,m_true,'LineWidth',2); grid on;
ylabel("Kütle (kg)");
title("Gerçek Kütle Davranışı (Simülasyon)");

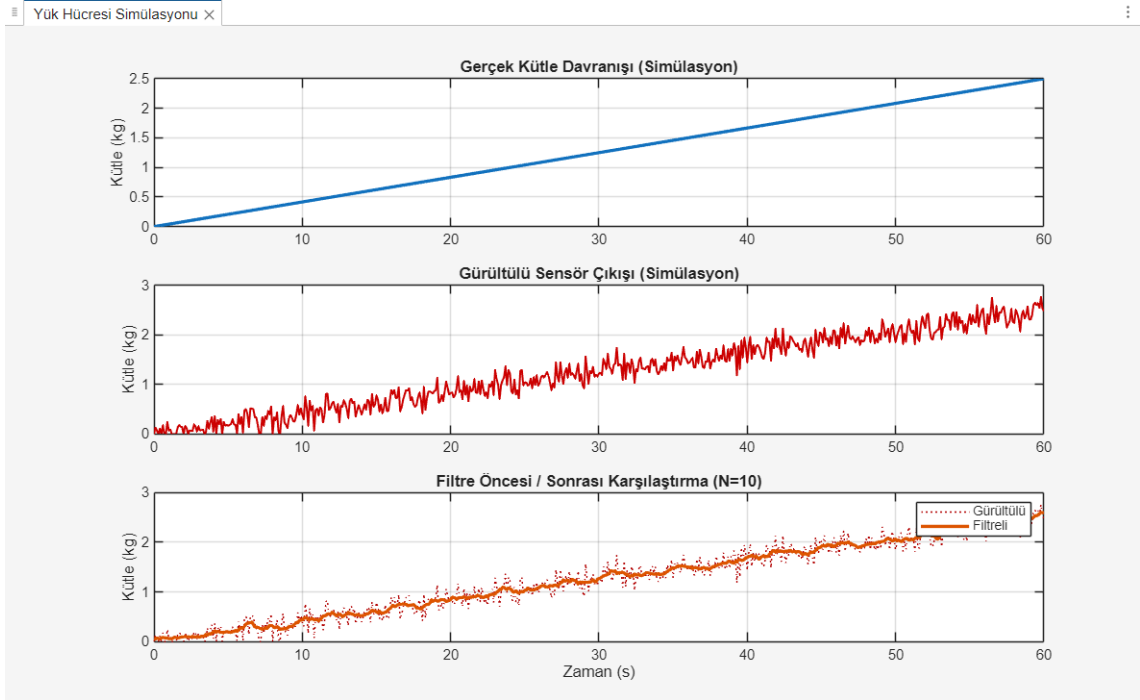
subplot(3,1,2);
plot(t,m_meas,'Color',[0.8 0 0],'LineWidth',1.2); grid on;
ylabel("Kütle (kg)");
title("Gürültülü Sensör Çıkışı (Simülasyon)");

subplot(3,1,3);
plot(t,m_meas,':','Color',[0.7 0 0]); hold on;
plot(t,m_filt,'LineWidth',2);
grid on;
xlabel("Zaman (s)");
ylabel("Kütle (kg)");
title(sprintf("Filtre Öncesi / Sonrası Karşılaştırma (N=%d)",N));
legend("Gürültülü","Filtreli");

err_meas = m_meas - m_true;
err_filt = m_filt - m_true;

rmse_meas = sqrt(mean(err_meas.^2));
rmse_filt = sqrt(mean(err_filt.^2));

fprintf("\n--- Simülasyon Sonuçları ---\n");
fprintf("Filtre Öncesi RMSE : %.3f kg\n",rmse_meas);
fprintf("Filtre Sonrası RMSE: %.3f kg\n",rmse_filt);
```



Şekil 4.1.4.1. Gerçek Kütle Davranışına göre Gürültü Simülasyonları

```

Command Window

--- Simülasyon Sonuçları ---
Filtre Öncesi RMSE : 0.151 kg
Filtre Sonrası RMSE: 0.054 kg
>> ⚡ Press Ctrl + Shift + P to generate code with Copilot

```

Şekil 4.1.4.2. Simülasyon Çıktısı

Bu simülasyonda, hazne altında konumlandırılan yük hücresinden elde edilen ağırlık verilerinin gürültü etkisi altındaki davranışı ve filtreleme sonrasında ölçüm doğruluğundaki iyileşme incelenmiştir. Projede hazne doluluğunun belirlenmesi, adaptif hız kontrol algoritmasının çalıştırılması ve 2.5 kg eşik değerine ulaşıldığında otomatik boşaltma sürecinin başlatılması yük hücresinden alınan veriye bağlı olduğundan, ölçüm verisinin kararlı ve güvenilir olması sistem açısından kritik öneme sahiptir.

Birinci grafikte, simülasyon ortamında tanımlanan gerçek kütle davranışı gösterilmektedir. Hazne içerisindeki çim miktarı zamanla doğrusal olarak artmakta ve 60 saniye sonunda maksimum 2.5 kg seviyesine ulaşmaktadır. Bu eğri, ideal koşullarda haznenin dolum sürecini temsil etmektedir.

İkinci grafikte, yük hücresinden alınabilecek gürültülü sensör çıkışı modellenmiştir. Gerçek sistemde motor titreşimleri, paletli hareketten kaynaklanan sarsıntılar, zemindeki düzensizlikler, elektriksel gürültü ve yük hücresinin hassas ölçüm yapısı nedeniyle ağırlık verisi ideal biçimde ölçülememektedir. Bu nedenle grafikte gerçek kütle artışına ek olarak rastgele dalgalanmalar görülmektedir. Özellikle otomatik boşaltma eşiği gibi karar noktalarında bu tür gürültüler, sistemin erken veya hatalı karar vermesine neden olabileceğinden filtreleme gereklidir.

Üçüncü grafikte filtreleme öncesi ve sonrası ağırlık verileri karşılaştırılmıştır. Gürültülü veri noktalı çizgiyle, hareketli ortalama filtresinden geçirilmiş veri ise düz çizgiyle gösterilmiştir. Kullanılan $N = 10$ örnekli hareketli ortalama filtresi, ani dalgalanmaları azaltarak ölçüm verisini daha düzgün ve takip edilebilir hâle getirmiştir. Filtrelenmiş veri, gerçek kütle artış eğilimini korurken gürültü kaynaklı ani sıçramaları önemli ölçüde bastırmaktadır.

Bu sonuçlar, yük hücresi verisinin doğrudan kullanılmasının sistem kararları açısından riskli olabileceğini; filtreleme uygulandığında ise hazne doluluğunun daha güvenilir şekilde izlenebileceğini göstermektedir. Filtrelenmiş ağırlık verisi sayesinde adaptif hız kontrol algoritması daha kararlı çalışmakta, 2.5 kg boşaltma eşiğine yaklaşma durumu daha doğru izlenmekte ve servo motor destekli boşaltma mekanizmasının hatalı tetiklenme olasılığı azaltılmaktadır.

Genel olarak filtreleme simülasyonu, yük hücresinden elde edilen ölçüm verisinin gerçek sistem koşullarında gürültüye maruz kalabileceğini ve bu nedenle yazılımsal filtrelemenin gerekli olduğunu ortaya koymaktadır. Hareketli ortalama filtresi, basit yapısına rağmen ölçüm sinyalini yumuşatarak sistemin karar verme doğruluğunu artırmakta ve projenin güvenilir çalışma hedefini desteklemektedir.

4.2. Web Kontrol Paneli

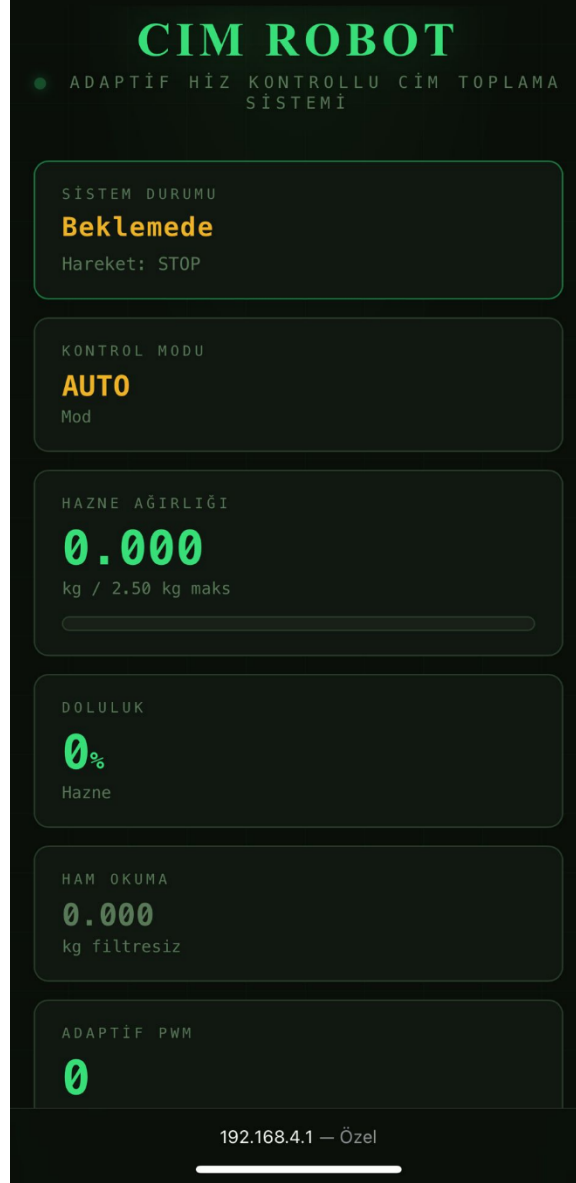
Proje kapsamında geliştirilen otonom çim toplama robotunun izlenmesi ve kontrol edilmesi amacıyla ESP32-S3-N16R8 mikrodenetleyicisi üzerinde çalışan web tabanlı bir kontrol arayüzü tasarlanmıştır. Bu arayüz, robotun herhangi bir ek mobil uygulamaya ihtiyaç duymadan telefon, tablet veya bilgisayar üzerinden kontrol edilmesini sağlamaktadır. ESP32-S3 kartı erişim noktası olarak yapılandırılmış ve kullanıcıların robotun oluşturduğu kablosuz ağa bağlanarak 192.168.4.1 adresi üzerinden sisteme erişmesi mümkün hâle getirilmiştir.

Web arayüzü; sistem durumunun izlenmesi, hazne ağırlığının takip edilmesi, vakum motorunun kontrol edilmesi, servo destekli hazne kapağının yönetilmesi, paletli hareket sisteminin manuel olarak sürülmesi ve temel sistem komutlarının gönderilmesi için tasarlanmıştır. Arayüzün koyu renkli ve yüksek kontrastlı yapısı, dış ortam koşullarında okunabilirliği artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca mobil ekranlara uyumlu tasarım sayesinde sistem, akıllı telefon üzerinden rahatlıkla kullanılabilir.

Web arayüzü; sistem durumunun izlenmesi, hazne ağırlığının takip edilmesi, vakum motorunun kontrol edilmesi, servo destekli hazne kapağının yönetilmesi, paletli hareket sisteminin manuel olarak sürülmesi ve temel sistem komutlarının gönderilmesi için tasarlanmıştır. Arayüzün koyu renkli ve yüksek kontrastlı yapısı, dış ortam koşullarında okunabilirliği artırmayı amaçlamaktadır. Ayrıca mobil ekranlara uyumlu tasarım sayesinde sistem, akıllı telefon üzerinden rahatlıkla kullanılabilir.

Arayüzün üst bölümünde robotun genel çalışma durumu görüntülenmektedir. (Bkz. Şekil 4.2.1) Sistem Durumu alanı robotun beklemede, toplama modunda veya boşaltma aşamasında olup olmadığını göstermektedir. Bu bölümde ayrıca robotun hareket yönü de görüntülenmekte, böylece kullanıcının sistemin anlık hareket davranışını takip etmesi sağlanmaktadır. Kontrol Modu alanında sistemin çalışma modu gösterilmektedir. Bu mod, robotun manuel veya otomatik kontrol durumunun kullanıcı tarafından izlenebilmesine olanak tanımaktadır.

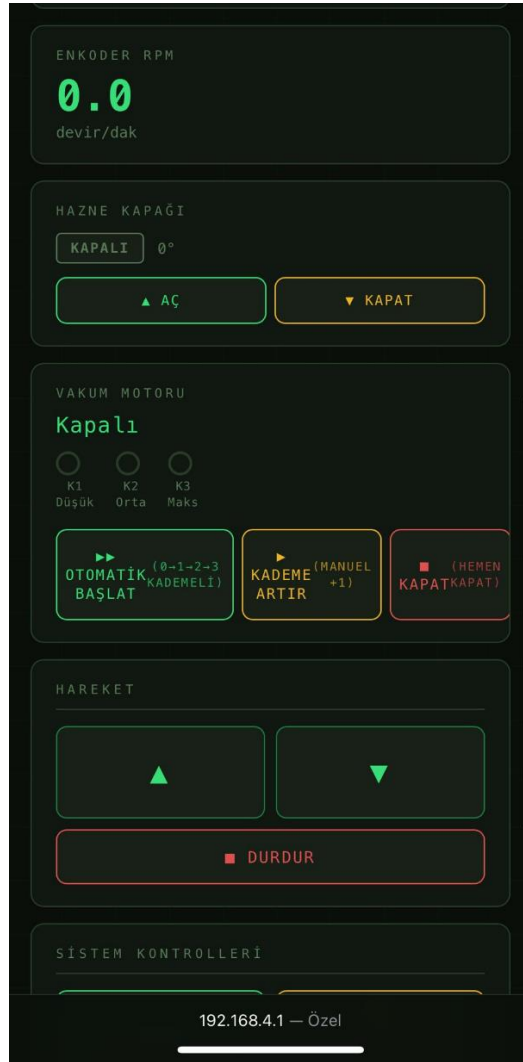
Arayüzde yer alan Hazne Ağırlığı bölümü, yük hücresinden elde edilen ağırlık verisini kilogram cinsinden göstermektedir. Bu değer, robotun çim toplama haznesinde biriken yük miktarının izlenmesi açısından temel geri bildirimlerden biridir. Ağırlık değerine bağlı olarak Doluluk yüzdesi de hesaplanmakta ve kullanıcıya görsel bir doluluk çubuğu ile sunulmaktadır. Hazne yükü belirlenen 2.5 kg eşik değerine ulaştığında sistem boşaltma sürecine geçecek şekilde tasarlanmıştır. Bunun yanında Ham Okuma bölümü, filtrelenmemiş yük hücresi verisini göstererek sensör davranışının izlenmesine ve kalibrasyon sürecinin değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 4.2.1. Web Kontrol Paneli

Web arayüzünde Adaptif PWM alanı, yük durumuna göre belirlenen motor sürüş sinyalini göstermektedir. (Bkz. Şekil 4.2.2) Hazne ağırlığı arttıkça robotun hareket kontrolünde kullanılan PWM değeri adaptif olarak düzenlenmektedir. Bu sayede sistemin değişen yük koşullarında daha kararlı hareket etmesi hedeflenmektedir. Enkoder RPM alanı ise palet motorlarından alınan enkoder verisine bağlı olarak hız bilgisini devir/dakika cinsinden göstermektedir. Bu veri, robotun hareket performansının izlenmesi ve hız kontrolünün değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Hazne Kapağı bölümü, otomatik boşaltma mekanizmasına ait servo motorun durumunu göstermektedir. Bu bölümde kapağın açık veya kapalı konumu ile servo açısı kullanıcıya sunulmaktadır. Ayrıca manuel kontrol amacıyla Aç ve Kapat butonları eklenmiştir. Aç butonu servo motoru boşaltma konumuna getirerek hazne kapağının açılmasını sağlar. Kapat butonu ise servo motoru kapalı konuma döndürerek hazne kapağını tekrar kapatır. Bu özellik, otomatik boşaltma mekanizmasının test edilmesi ve gerektiğinde manuel olarak kontrol edilmesi için kullanılmıştır.



Şekil 4.2.2. Web Kontrol Paneli

Vakum Motoru bölümü, süpürge motorunun çalışma kademelerini yönetmek için tasarlanmıştır. (Bkz. Şekil 4.2.3) Kullanılan vakum sistemi dört modlu çalışmaktadır: kapalı, düşük kademe, orta kademe ve maksimum kademe. Arayüzde K1, K2 ve K3 göstergeleri ile aktif vakum kademesi görsel olarak takip edilebilmektedir. Otomatik Başlat butonu, vakum motorunu belirli zaman aralıklarıyla kademeli olarak çalıştırır. Bu işlemde sistem sırasıyla kapalı durumdan düşük, orta ve maksimum kademeye geçer. Böylece vakum motorunun ani yüklenmeden korunması ve daha kontrollü biçimde çalıştırılması hedeflenmiştir. Kademe Artır butonu, vakum motorunun mevcut modunu manuel olarak bir sonraki kademeye geçirir. Kapat butonu ise vakum motorunu mevcut kademesinden kapalı moda döndürmek için kullanılır. Bu yapı, röle üzerinden vakum motorunun fiziksel butonunun elektronik olarak taklit edilmesi prensibine dayanmaktadır.

Arayüzdeki Hareket bölümünde robotun manuel hareket kontrolü sağlanmaktadır. Yukarı ok butonu robotun ileri yönde hareket etmesini, aşağı ok butonu ise geri yönde hareket etmesini sağlar. Durdur butonu tüm hareket komutlarını sonlandırarak palet motorlarını durdurur. Bu bölüm, özellikle prototip testleri sırasında robotun kontrollü şekilde yönlendirilmesi ve motor sürücü sisteminin doğrulanması amacıyla kullanılmıştır.

Sistem Kontrolleri bölümünde robotun temel çalışma komutları yer almaktadır. Başlat butonu robotu toplama moduna geçirir ve sistemin ana çalışma döngüsünü başlatır. Dara Al butonu yük hücrelerinin sıfırlanmasını sağlayarak hazne boşken ağırlık ölçümünün referans noktasını belirler. Boşalt butonu manuel olarak boşaltma sürecini başlatır ve servo motorun hazne kapağını açmasını sağlar. Mod Değiştir butonu ise sistemin kontrol modunun değiştirilmesi için arayüzde yer almaktadır.

Arayüzün alt kısmında bulunan İşlem Günlüğü, sistemde gerçekleşen temel olayları zaman bilgisiyle birlikte kaydetmektedir. Örneğin sistemin başlatılması, durdurulması, ileri hareket komutu, HX711 sensörünün yanıt verip vermemesi ve sensör bağlantısının geri gelmesi gibi durumlar bu bölümde görüntülenmektedir. Bu kayıt alanı, prototip testleri sırasında hata takibi ve sistem davranışının gözlemlenmesi açısından önemli bir işlev görmektedir.



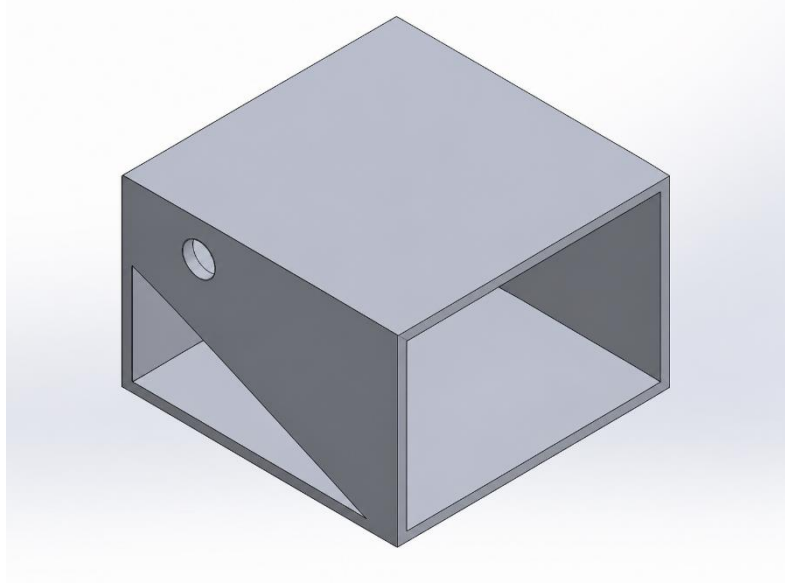
Şekil 4.2.3. Web Kontrol Paneli

Genel olarak geliştirilen web tabanlı kontrol arayüzü, robotun hem manuel hem de yarı otonom işlevlerinin kullanıcı tarafından izlenmesini ve yönetilmesini sağlamaktadır. Hazne ağırlığı, doluluk oranı, motor sürüş sinyali, enkoder hızı, servo kapağı ve vakum kademesi gibi kritik verilerin tek ekranda sunulması, sistemin test ve doğrulama sürecini kolaylaştırmıştır. Bu arayüz sayesinde geliştirilen prototipin mekanik, elektronik ve yazılımsal bileşenleri bütünleşik olarak kontrol edilebilmiş ve proje kapsamında hedeflenen otonom çim toplama ve otomatik boşaltma işlevleri kullanıcı dostu bir platform üzerinden yönetilebilir hâle getirilmiştir.

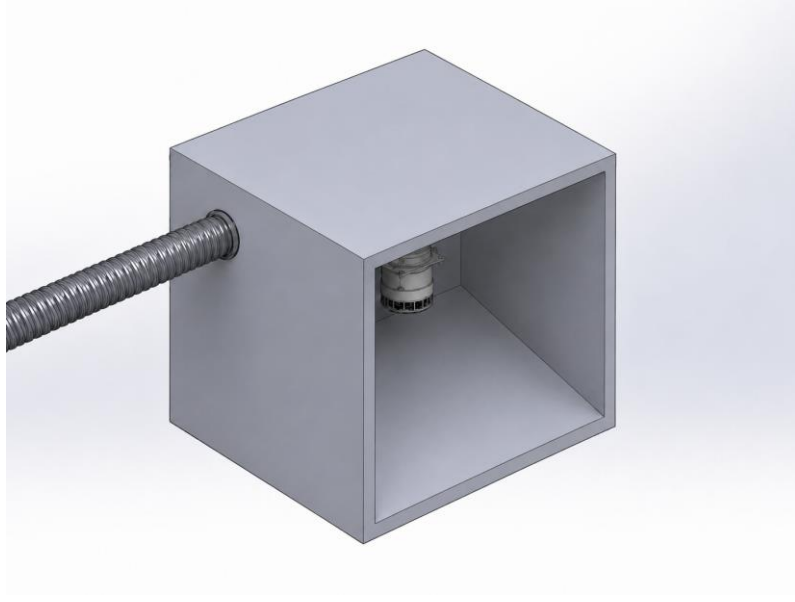
4.3. Teknik Çizim

Aşağıda bu proje kapsamında yaptığımız teknik çizimler yer almaktadır.

(Bkz. Şekil 4.2.1.), (Bkz. Şekil 4.2.2.)



Şekil 4.2.1. Hazne Teknik Çizimi



Şekil 4.2.2. Hazne Teknik Çizimi

Tasarlanan depolama haznesi, çim toplama, geçici depolama, ağırlık ölçümü ve otomatik boşaltma süreçlerini aynı mekanik yapı üzerinde gerçekleştirecek şekilde geliştirilmiştir. Haznenin dış geometrisi dikdörtgen prizma formunda tasarlanmıştır. Bu dış form, robot gövdesi içerisine yerleşim kolaylığı sağlaması, imalat sürecini basitleştirmesi ve haznenin paletli sistem üzerinde dengeli biçimde konumlandırılmasına olanak tanınması açısından tercih edilmiştir. Dikdörtgen dış yapı sayesinde hazne, gövde içerisinde belirli bir referans düzleme göre hizalanabilmekte ve altına yerleştirilecek ağırlık sensörü için düzgün bir temas yüzeyi oluşturabilmektedir.

Haznenin iç geometrisi ise dış formdan farklı olarak eğimli taban yapısına sahiptir. İç yüzeyde oluşturulan eğim, çimin hazne içerisinde kontrollü şekilde yönlendirilmesini ve boşaltma sırasında yerçekimi etkisiyle dışarı kaymasını sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu eğimli yapı sayesinde hazne içerisine gelen çim, düz bir taban üzerinde rastgele birikmek yerine, eğimin yönlendirdiği doğrultuda aşağı doğru kayarak hazne içerisinde daha düzenli bir dolun davranışı göstermektedir. Böylece hem haznenin kullanılabilir hacminden daha verimli yararlanılması hem de boşaltma sırasında çimin içeride takılmadan dışarı tahliye edilmesi hedeflenmiştir.

Haznenin bir yüzeyi, boşaltma işlemini gerçekleştirmek üzere açılır duvar olarak düşünülmüştür. Normal çalışma sırasında bu duvar kapalı konumda bulunmakta ve hazne içinde biriken çimin dışarı çıkmasını engellemektedir. Hazne içerisindeki çim miktarı belirlenen eşik değere ulaştığında sistem durdurulmakta ve servo motor mekanizması ile bu duvar aşağı yönde açılmaktadır. Açılır duvarın yaklaşık 180° aşağı doğru hareket etmesiyle, hazne içerisindeki eğimli taban yapısının boşaltma doğrultusunda devam etmesi sağlanmaktadır. Bu tasarım sayesinde açılan duvar, yalnızca bir kapak görevi görmekle kalmamakta; aynı zamanda çimin dışarı kaymasını kolaylaştıran eğimli bir tahliye yüzeyi gibi davranmaktadır.

Boşaltma mekanizmasında servo motorun kullanılması, hazne duvarının kontrollü ve tekrarlanabilir biçimde açılıp kapanmasını sağlamaktadır. Servo motor, açılacak duvarın alt orta noktasına konumlandırılacak şekilde değerlendirilmiştir. Bu konumlandırma ile duvar hareketinin merkezden uygulanması, açılma sırasında daha dengeli bir kuvvet aktarımı oluşturmakta ve kapak hareketinin tek taraflı zorlanma etkisiyle bozulmasını azaltmaktadır. Boşaltma sürecinde önce robotun ilerleme hareketi durdurulmakta, ardından servo motor duvarı açmakta ve çim yerçekimi etkisiyle dışarı tahliye edilmektedir. Boşaltma tamamlandıktan sonra duvar tekrar kapalı konuma getirilerek sistemin yeni toplama döngüsüne hazır hâle gelmesi amaçlanmıştır.

Hazneye çim girişinin sağlanması için hortum bağlantısı, eğimin yüksek olduğu bölgeden hazne içerisine yönlendirilmiştir. Hortumun bu konumdan girmesi, vakumla taşınan çimin hazne içerisinde doğrudan eğimli yüzeye aktarılmasını sağlamaktadır. Çim, yüksek noktadan hazneye girdikten sonra eğim boyunca aşağı doğru kayarak hazne içerisine yayılmaktadır. Bu yaklaşım, çimin giriş noktasında yığılmasını azaltmakta ve hazne içerisinde daha düzenli bir dolun oluşmasına katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda çimin doğal olarak boşaltma yönüne doğru konumlanmasını sağladığından, açılır duvar aktive edildiğinde haznenin daha hızlı ve daha az artık bırakacak şekilde boşalması beklenmektedir.

Vakumla toplama işleminin sürekliliğini sağlamak amacıyla süpürge motoru hazne tavanına yerleştirilmiştir. Tavanda konumlandırılan vakum motoru, hortum hattı ve süpürge başlığı üzerinden gelen çimin hazneye çekilmesi için gerekli emiş etkisini oluşturmaktadır. Motorun üst bölgede yer alması, hazne içerisindeki depolama hacminin daha verimli kullanılmasına ve çim birikiminin motor girişini doğrudan engellememesine katkı sağlamaktadır. Böylece vakum hattından gelen çim, hazne içerisine yönlendirilirken motorun oluşturduğu emiş kuvveti toplama işlemini desteklemektedir.

Hazne tasarımında ağırlık ölçüm sistemi de mekanik yerleşimin önemli bir parçası olarak ele alınmıştır. Haznenin dıştan dikdörtgen formda olması, ağırlık sensörünün hazne altına düzgün ve dengeli biçimde yerleştirilmesine imkân tanımaktadır. Ağırlık sensörünün, haznenin boş durumdaki ağırlık merkezine karşılık gelen alt bölgeye konumlandırılması planlanmıştır. Bu yerleşim sayesinde haznenin boş ağırlığı sistem başlangıcında tara değeri olarak alınmakta ve daha sonra hazne içinde biriken çimin net kütlesi hesaplanmaktadır. Böylece ölçülen toplam ağırlıktan haznenin kendi ağırlığı çıkarılarak yalnızca depolanan çim miktarı belirlenebilmektedir.

Ağırlık sensöründen elde edilen veri, hazne doluluğunun izlenmesi, adaptif hız kontrol algoritmasının çalıştırılması ve otomatik boşaltma kararının verilmesi açısından temel geri besleme parametresidir. Hazne içerisindeki çim kütlesi 2.5 kg eşik değerine ulaştığında sistem bu durumu algılamakta, robotun ilerleme hareketini durdurmakta ve servo kontrollü boşaltma mekanizmasını devreye almaktadır. Bu nedenle hazne geometrisi, ağırlık sensörü konumu, hortum giriş noktası, süpürge motoru yerleşimi ve açılır duvar mekanizması birlikte değerlendirilmiş; sistemin hem ölçüm doğruluğu hem de mekanik boşaltma verimliliği açısından uyumlu çalışması hedeflenmiştir.

Genel olarak haznenin teknik tasarımı; dıştan sade ve imalata uygun dikdörtgen bir gövde, içte boşaltmayı kolaylaştıran eğimli taban, üst bölgede vakum motoru, eğimin yüksek tarafından giren hortum hattı, alt merkezde konumlandırılan ağırlık sensörü ve servo motorla kontrol edilen açılır duvar bileşenlerinden oluşmaktadır. Bu bütünleşik yapı sayesinde çimin hazneye alınması, düzenli şekilde depolanması, ağırlığının ölçülmesi ve eşik değere ulaşıldığında otomatik olarak tahliye edilmesi tek bir mekanik sistem üzerinden gerçekleştirilebilmektedir.

5. SONUÇLAR

5.1. Risk Yönetim Tablosu

Proje kapsamında geliştirilen paletli, vakum destekli çim toplama ve otomatik boşaltma sisteminde karşılaşılabilecek teknik riskler belirlenmiş ve bu riskler olasılık, etki ve risk skoru açısından değerlendirilmiştir. Risk yönetim tablosunda her bir risk için gerçekleşme olasılığı ve proje üzerindeki etkisi yüzde olarak ifade edilmiş; risk skoru ise **Risk Skoru = Olasılık yüzdesi × Etki yüzdesi** bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem sayesinde riskler sayısal olarak karşılaştırılabilir hâle getirilmiş ve önceliklendirme yapılmıştır.

EN ÖNEMLİ RİSKLER	ALINACAK TEDBİRLER	OLASILIK	ETKİ	RİSK SKORU	RİSK DÜZEYİ
Batarya grubunun yeterli gerilim veya akım sağlayamaması	3S3P lityum-iyon pil bağlantıları kontrol edilir, BMS/koruma devresi kullanılır, yük altında gerilim düşümü test edilir.	% 50	% 90	45.00	YÜKSEK (Kırmızı)
Yük hücresinin hatalı ölçüm yapması veya dara değerinin kayması	Düzenli kalibrasyon yapılır, boş hazne darası alınır, yazılımsal filtreleme uygulanır.	% 40	% 80	32.00	ORTA (Sarı)
Hazne 2.5 kg eşiğine ulaştığında boşaltma mekanizmasının çalışmaması	Servo motor bağlantıları ve açılımları test edilir, mekanik toleranslar kontrol edilir.	% 35	% 85	29.75	ORTA (Sarı)
Vakum hattında çim birikmesi veya hortumun tıkanması	35 mm hortum hattı kontrol edilir, giriş açısı uygun seçilir, birikme oluşmaması için test yapılır.	% 45	% 85	38.25	ORTA (Sarı)
Palet motorlarının yük altında yavaşlaması veya dengesiz ilerlemesi	Enkoder geri bildiriyle motor RPM takibi yapılır, adaptif hız kontrolü uygulanır.	% 40	% 75	30.00	ORTA (Sarı)
ESP32 tabanlı web kontrol arayüzünde bağlantı kopması	Manuel kontrol alternatifi bırakılır, Wi-Fi bağlantı kararlılığı test edilir, güvenli varsayılan durumlar tanımlanır.	% 30	% 70	21.00	ORTA (Sarı)
Vakum motorunun beklenen emiş performansını sağlayamaması	Motor gücü, hortum uzunluğu, başlık konumu ve hava kaçakları test edilir; gerekirse hat kısaltılır veya sızdırmazlık iyileştirilir.	% 35	% 75	26.25	ORTA (Sarı)

Tablo 5.1. Risk Yönetim Tablosu

Tabloda yer alan en yüksek risklerden biri, batarya grubunun yeterli gerilim veya akım sağlayamaması olarak belirlenmiştir. Sistemde vakum motoru, palet motorları, servo motor, ESP32 kontrol kartı ve sensörler aynı güç altyapısı üzerinden çalıştığından, batarya kaynaklı gerilim düşümü sistemin bütünleşik çalışmasını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle 3S3P lityum-iyon pil grubunun bağlantılarının kontrol edilmesi, BMS veya koruma devresi kullanılması ve yük altında gerilim düşümü testlerinin yapılması temel önlem olarak belirlenmiştir. Bu riskin skoru 45.00 olarak hesaplanmış ve yüksek risk düzeyinde değerlendirilmiştir.

Yük hücresinin hatalı ölçüm yapması veya dara değerinin kayması da sistemin doğru çalışmasını etkileyebilecek önemli risklerden biridir. Hazne doluluğunun izlenmesi, adaptif hız kontrolünün uygulanması ve 2.5 kg eşik değerine ulaşıldığında otomatik boşaltma kararının verilmesi yük hücresinden alınan verilere bağlıdır. Bu nedenle ölçüm hataları, sistemin erken veya geç boşaltma yapmasına neden olabilir. Bu riski azaltmak amacıyla düzenli kalibrasyon yapılması, boş hazne darasının sistem başlangıcında alınması ve yazılımsal filtreleme uygulanması planlanmıştır.

Hazne 2.5 kg eşik değerine ulaştığında boşaltma mekanizmasının çalışmaması, otomatik boşaltma işlevini doğrudan etkileyen bir diğer önemli risktir. Bu durumda hazne dolu kalabilir, sistemin toplama döngüsü kesintiye uğrayabilir veya mekanik zorlanmalar oluşabilir. Bu riske karşı servo motor bağlantılarının ve aç sınırlarının test edilmesi, hazne duvarının sürtünmesiz açılması için mekanik toleransların kontrol edilmesi ve boşaltma mekanizmasının tekrar edilebilirliğinin doğrulanması gerekmektedir.

Vakum hattında çim birikmesi veya hortumun tıkanması, toplama verimini azaltabilecek ve vakum motorunun zorlanmasına neden olabilecek bir risk olarak değerlendirilmiştir. Projede çim, 35 mm çapındaki hortum hattı üzerinden hazneye taşındığından hortum giriş açısı, süpürge başlığı konumu ve hava akış sürekliliği kritik öneme sahiptir. Bu nedenle hortum hattının düzenli kontrol edilmesi, giriş açısının uygun seçilmesi ve başlık çevresinde birikme oluşup oluşmadığının test edilmesi önerilmiştir.

Palet motorlarının yük altında yavaşlaması veya dengesiz ilerlemesi, sistemin hareket kararlılığı açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Haznede biriken çim miktarı arttıkça robotun toplam kütlesi ve hareket direnci artmaktadır. Bu durum palet motorlarının zorlanmasına veya sistemin düz ilerleme performansının bozulmasına neden olabilir. Bu riski azaltmak için enkoder geri bildiriyle motor RPM takibi yapılması ve adaptif hız kontrol algoritması ile yük artışına göre motor komutlarının düzenlenmesi planlanmıştır.

ESP32 tabanlı web kontrol arayüzünde bağlantı kopması, kullanıcı kontrolü ve sistem izleme açısından orta düzeyde risk taşımaktadır. Web arayüzü üzerinden dara alma, sıfırlama, durdurma ve manuel hareket komutları verilebildiği için bağlantı kararlılığı önemlidir. Bu riskin azaltılması amacıyla Wi-Fi bağlantı kararlılığının test edilmesi, manuel kontrol alternatifi bırakılması ve bağlantı kopması durumunda sistemin güvenli varsayılan durumlara geçmesi önerilmiştir.

Vakum motorunun beklenen emiş performansını sağlayamaması ise çim toplama başarısını etkileyebilecek risklerden biridir. Motor gücü, hortum uzunluğu, başlık konumu ve olası hava kaçakları emiş performansını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle motorun gerçek çalışma koşullarında test edilmesi, hortum hattının mümkün olduğunca kısa ve sızdırmaz tasarlanması ve gerektiğinde bağlantı noktalarında iyileştirme yapılması alınacak tedbirler arasında yer almaktadır.

Genel olarak risk yönetim tablosu, projede karşılaşılabilecek teknik aksaklıkların önceden belirlenmesini ve bu aksaklıklara karşı uygulanabilecek önlemlerin sistematik biçimde tanımlanmasını sağlamaktadır. Yapılan değerlendirmede batarya kaynaklı güç problemi yüksek risk düzeyinde; yük hücresi, boşaltma mekanizması, vakum hattı, palet motorları, web arayüzü ve vakum motoru ile ilgili riskler ise orta risk düzeyinde sınıflandırılmıştır. Bu değerlendirme, proje sürecinde test, kalibrasyon, güç yönetimi ve mekanik doğrulama çalışmalarına öncelik verilmesi gerektiğini göstermektedir.

5.2. Maaliyet Tablosu

Kullanılan komponentler ile oluşturulan maaliyet tablosu aşağıda gösterilmiştir. (Bkz. Tablo 5.2)

PARÇALAR	MAALİYET
ESP32-S3-N16R8	450,00 TL
20 Kg Ağırlık Sensör Seti	513,96 TL
DC Motor x 2	1000 TL
Motor Sürücü Kartı x 2	473,96 TL
Pil Yuvası	32,83 TL
Süpürge Motoru	2000 TL
12.6V Batarya	1206 TL
Artımlı Optik Döner Enkoder	486,00 TL
DS3218MG Servo Motor	1500 TL
5V Röle Kartı - 1 Kanal	38,30 TL
Düşürücü Voltaj Regülatörü	156,60 TL
3D Baskı (Şasi + Paletler + Hazne)	25 000,00 TL
TOPLAM:	32.857,65 TL

Tablo 5.2. Maaliyet Tablosu

6. ETKİ BEYANI

Bu proje, yük değişimine göre adaptif hız kontrollü tam otomatik çim toplama ve boşaltma sistemi geliştirmeyi amaçladığından; enerji verimliliği, teknolojik yenilik ve sürdürülebilir kaynak kullanımı açısından Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları ile ilişkilendirilebilir. Proje özellikle **Amaç 7: Erişilebilir ve Temiz Enerji**, **Amaç 9: Sanayi, Yenilikçilik ve Altyapı** ve **Amaç 12: Sorumlu Tüketim ve Üretim** başlıklarıyla uyumludur.

Amaç 7 kapsamında proje, batarya ile çalışan bir sistemde enerji kullanımının daha verimli yönetilmesine katkı sağlamaktadır. Hazne içerisindeki çim yükü yük hücresi ile ölçülmekte ve robotun hareket hızı bu veriye göre adaptif olarak ayarlanmaktadır. Böylece sistem, sabit ve gereğinden fazla güç tüketmek yerine anlık yük durumuna uygun şekilde çalışmaktadır. Ayrıca vakum motorunun kademeli olarak devreye alınması, ani akım çekişlerini azaltarak enerji yönetimini desteklemektedir.

Amaç 9 açısından proje; ESP32-S3 tabanlı kontrol sistemi, yük hücresi, enkoder, röle kontrollü vakum motoru, dijital servo motor ve web tabanlı kontrol arayüzünü bir araya getiren yenilikçi bir robotik prototiptir. Bu yapı, düşük maliyetli ve erişilebilir donanımlarla otomatik çim toplama, adaptif hız kontrollü ve otomatik boşaltma işlevlerinin gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Bu yönüyle proje, gömülü sistemler ve robotik otomasyon alanlarında yenilikçi uygulamaların geliştirilmesine katkı sunmaktadır.

Amaç 12 kapsamında proje, çim atıklarının kontrollü biçimde toplanması, depolanması ve boşaltılmasını sağlayarak daha düzenli bir kaynak yönetimi sunmaktadır. Hazne doluluk durumunun sensörle izlenmesi, gereksiz çalışma süresini azaltmakta ve sistemin yalnızca ihtiyaç duyulan durumda boşaltma işlemine geçmesini sağlamaktadır. Ayrıca modüler yapıdaki mekanik ve elektronik tasarım, bakım ve parça değişimini kolaylaştırarak sistemin kullanım ömrünü artırmaktadır.

Genel olarak proje; enerji verimliliği sağlayan adaptif kontrol yapısı, yenilikçi robotik entegrasyonu ve çim atıklarının kontrollü yönetimi sayesinde sürdürülebilirlik hedefleriyle uyumlu bir mühendislik çözümü sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] R. Gupta and S. Kumar, "Autonomous Lawn Mower — A Comprehensive Review," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 42, no. 5, pp. 501–515, 2025.
- [2] P. Santhoshini, K. H. Prabha, S. T. Jaibalaji, C. B. Krishna Vishwa, H. Ramesh Kumar, and S. Mano Sundar, "Implementation of Automatic Lawn Mower System for Smart Lawn Maintenance," *IEEE*, 2024.
- [3] H. Yang, Y. Zhao, and C. Ye, "Adaptive Double-Loop PID Control Method of DC Motor Based on GA-FNC Algorithm," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 43, no. 2, pp. 2271–2281, 2022.
- [4] T. Wang, J. Chen, and Y. Liu, "A Novel PID Controller for BLDCM Speed Control Using Dual Fuzzy Logic Systems," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 10, pp. 1–12, 2022.
- [5] A. Sharma, "The Development of Current, Speed and Torque Measurement Technique for Hub BLDC Motor," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 10, no. 6, pp. 145–150, 2021.
- [6] U.S. Department of Energy, "Determining Electric Motor Load and Efficiency," *U.S. DOE Motor System Tip Sheet*, Washington D.C., 2014.
- [7] U.S. Patent US 11,716,931 B2, "Work equipment with autonomous collection container," (discussing actuator-operated grass container dumping).
- [8] European Patent Office, "Adaptive Engine Speed Control Method," *EP Patent 3871485B1*, Aug. 2021.
- [9] L. Bruzzone, S. E. Nodehi, and P. Fanghella, "Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review," *Machines*, vol. 10, no. 8, Art. no. 648, 2022, doi: 10.3390/machines10080648.
- [10] J.-C. Liao, S.-H. Chen, Z.-Y. Zhuang, B.-W. Wu, and Y.-J. Chen, "Designing and Manufacturing of Automatic Robotic Lawn Mower," *Processes*, vol. 9, no. 2, Art. no. 358, 2021, doi: 10.3390/pr9020358.
- [11] J. Gao, Y. Li, J. Jin, Z. Jia, and C. Wei, "Design, Analysis and Control of Tracked Mobile Robot with Passive Suspension on Rugged Terrain," *Actuators*, vol. 14, no. 8, Art. no. 389, 2025, doi: 10.3390/act14080389.
- [12] H. Jeon and D. Lee, "Explicit Identification of Pointwise Terrain Gradients for Speed Compensation of Four Driving Tracks in Passively Articulated Tracked Mobile Robot," *Mathematics*, vol. 11, no. 4, Art. no. 905, 2023, doi: 10.3390/math11040905.

- [13] T. Hiramatsu, S. Morita, M. Pencelli, M. Niccolini, M. Ragaglia, and A. Argiolas, "Path-Tracking Controller for Tracked Mobile Robot on Rough Terrain," in Proc. 21st International Conference on Field and Service Robotics, Barcelona, Spain, 2019.
- [14] J. G. Iossaqui, J. F. Camino, and D. E. Zampieri, "Adaptive Tracking Control of Tracked Mobile Robots with Unknown Slip Parameter," in Proc. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010.
- [15] A. Pollak, A. Gupta, and D. Göhlich, "Optimized Operation Management with Predicted Filling Levels of the Litter Bins for a Fleet of Autonomous Urban Service Robots," IEEE Access, vol. 12, pp. 7689–7703, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352436.
- [16] V. B. Justo, A. Gupta, T. F. Umland, and D. Göhlich, "Minimum Energy Utilization Strategy for Fleet of Autonomous Robots in Urban Waste Management," Robotics, vol. 12, no. 6, Art. no. 159, 2023, doi: 10.3390/robotics12060159.
- [17] M. P. Arthur, S. Shoba, and A. Pandey, "A Survey of Smart Dustbin Systems Using the IoT and Deep Learning," Artificial Intelligence Review, vol. 57, no. 3, Art. no. 56, 2024, doi: 10.1007/s10462-023-10646-6.
- [18] P. Zoumpoulis, F. K. Konstantinidis, G. Tsimiklis, and A. Amditis, "Smart Bins for Enhanced Resource Recovery and Sustainable Urban Waste Practices in Smart Cities: A Systematic Literature Review," Cities, vol. 152, Art. no. 105150, 2024, doi: 10.1016/j.cities.2024.105150.
- [19] J. A. Farré, C. Mateu, M. Teixidó, and L. F. Cabeza, "Pneumatic Urban Waste Collection Systems: A Review," Applied Sciences, vol. 13, no. 2, Art. no. 877, 2023, doi: 10.3390/

EKLER (uygun olarak eklenmesi gerekmektedir)

EK- YAPAY ZEKÂ KULLANIMI BEYANI VE IEEE ETİK KURALLARI

Bu proje raporunun hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ araçlarından sınırlı ve destekleyici amaçlarla yararlanılmıştır. Yapay zekâ desteği; metinlerin akademik dile uygun hâle getirilmesi, Türkçe ve İngilizce ifadelerin düzenlenmesi, rapor bölümlerinin daha anlaşılır biçimde yapılandırılması, web tabanlı kontrol arayüzü ve sistem bileşenlerinin açıklanması teknik ifadelerin rapor formatına uygun şekilde düzenlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Bununla birlikte proje fikri, sistem tasarımı, donanım seçimi, devre bağlantıları, prototip kurulumu, test süreci, deneysel gözlemler ve nihai mühendislik kararları proje ekibi tarafından gerçekleştirilmiştir.

Yapay zeka tarafından önerilen tüm teknik açıklamalar, kod düzenlemeleri ve metinsel ifadeler proje ekibi tarafından kontrol edilmiş, gerekli görülen kısımlar proje donanımı ve deneysel sonuçlarla uyumlu hâle getirilmiştir. Yapay zekâ çıktıları doğrudan doğrulanmamış bilgi olarak kabul edilmemiş; kullanılan teknik veriler, bileşen özellikleri ve sistem davranışları proje kapsamında yapılan uygulamalar, testler ve mühendislik değerlendirmeleri doğrultusunda gözden geçirilmiştir. Bu nedenle raporda yer alan nihai içerik ve sonuçlara ilişkin akademik, teknik ve etik sorumluluk proje ekibine aittir.

Bu çalışma kapsamında yapay zeka araçları herhangi bir deneysel verinin uydurulması, ölçüm sonuçlarının değiştirilmesi, kaynakların yanıltıcı biçimde oluşturulması veya proje çıktılarının gerçekte yapılmamış gibi gösterilmesi amacıyla kullanılmamıştır. Yapay zekâ desteği yalnızca yazım, düzenleme, açıklama geliştirme ve kod mantığını gözden geçirme gibi yardımcı süreçlerle sınırlandırılmıştır. Böylece akademik dürüstlük, şeffaflık ve hesap verebilirlik ilkelerine uygun hareket edilmiştir.

Projenin yürütülmesinde IEEE etik kuralları dikkate alınmıştır. Bu kapsamda mühendislik kararlarının güvenlik, kullanıcı sağlığı ve çevresel etkiler gözetilerek verilmesine özen gösterilmiştir. Elektronik sistemlerde ortak topraklama, uygun besleme gerilimleri, motor ve servo akım gereksinimleri, röle izolasyonu ve batarya güvenliği gibi konular değerlendirilerek prototipin güvenli biçimde çalışması hedeflenmiştir. Ayrıca raporda kullanılan bilgilerde doğruluk ve açıklık ilkeleri benimsenmiş; sistemin mevcut sınırlılıkları, kullanılan bileşenler ve test süreci gerçekçi biçimde ifade edilmiştir.

Sonuç olarak, yapay zekâ bu projede bir karar verici ya da bağımsız araştırmacı olarak değil, proje ekibine yazım ve teknik düzenleme süreçlerinde destek sağlayan yardımcı bir araç olarak kullanılmıştır. Proje ekibi, IEEE etik ilkeleri doğrultusunda çalışmanın doğruluğundan, güvenliğinden, özgünlüğünden ve raporda sunulan tüm teknik içerikten sorumlu olduğunu beyan eder.