T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can ÖZBARAN
161203001

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2020

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Can ÖZBARAN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

HAZİRAN 2020

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 161203001 numaralı öğrencisi **Can ÖZBARAN'ın "Otonom Mobil Depo Robotunun Mekatronik Sistem Tasarımı"** adlı tez çalışması Enstitümüz Yönetim Kurulunun 03/06/2020 tarih ve 2020/08 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından oybirliği ile Tezli Yüksek Lisans tezi olarak kabul...edilmiştir.

	Öğretim Üyesi Adı Soyadı	**İmzası**
Tez Savunma Tarihi :	17/06/2020	
1)Tez Danışmanı:	**Doç. Dr. Savaş DİLİBAL**	.....
2) Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üyesi Haydar ŞAHİN**	.....
3) Jüri Üyesi :	**Dr. Öğr. Üyesi Fethi OKYAR**	.....

Not: Öğrencinin Tez savunmasında **Başarılı** olması halinde bu form **imzalanacaktır**. Aksi halde geçersizdir.

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum "**OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI**" adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya 'da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (07/6/2020)

Can ÖZBARAN

ÖNSÖZ

“ Dünyada her şey için; uygarlık için, hayat için, başarı için en hakiki mürşit ilimdir; fendir. İlim ve fennin dışında rehber aramak dikkatsizliktir, bilgisizliktir, yanlışlıktır. Yalnız ilmin ve fennin yaşadığımız her dakikadaki devrelerinin olgunlaşmasını kavramak ve yükselişini zamanla izlemek şarttır. "

M. Kemal ATATÜRK

Tezimi hazırlarken yol gösteren, ilgilenen ve tez danışmanlığımı yapan İstanbul Gedik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Savaş DİLİBAL hocama, Sayın Dr. Mert DOĞANLI’ ya, bu çalışmada bana destek olan Createchnic Müh. ve Novosim Müh. firmalarına, her konuda yardımlarını esirgemeyen İstanbul Gedik Üniversitesine, bana anlayış gösteren ve destek veren Anneme, Babama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Kale Araştırma Geliştirme A.Ş. firmasına tezimin ilerlemesinde verdikleri destekten dolayı teşekkür ederim.

Haziran 2020 Can Özbaran

Makine Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **iii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **iv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **v**
ÖZET ..... **viii**
ABSTRACT ..... **xi**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Konusu 1
1.2 Tezin Amacı 5
2. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTLARI **6**
3. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI **11**
3.1 Mekanik Alt Sistem Tasarımı 14
3.1.1 Mobil depo robotu kavramsal tasarımı 14
3.1.2 Mekanik şasi tasarımı 17
3.1.3 Tekerlek tahrik sistemi tasarımı 20
3.1.4 Makaslı kaldırma sistemi tasarımı 22
3.1.5 Teleskobik mekanizma sistemi tasarımı 25
3.1.6 Paralel çeneli robotik tutucu sistem tasarımı 27
3.2 Elektrik-Elektronik Alt Sistem Tasarımı 37
3.3 Kontrol Alt Sistem Tasarımı 41
3.3.1 Mobil robotun kinematik hareket denklemleri 43
3.3.2 Mobil robotun hareket kontrol sistem yazılımı 44
3.3.3 Mobil robotun hareket simülasyonu 47
4. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTU SİSTEM ENTEGRASYONU **51**
4.1 Sistem Entegrasyonu 51
4.2 Prototip Geliştirme 52
5. ALT SİSTEMLERİN SAYISAL VE ANALİTİK ANALİZİ **56**
5.1 Makaslı Kaldırma Mekanizmasının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi 56
5.2 Teleskopik Mekanizmanın Analitik Hesaplama Yöntemi ile Analizi 62
5.2.1 Birinci bom yapısının kuvvet, moment, gerilme hesaplamaları 63
5.2.2 İkinci bom yapısının kuvvet, moment, gerilme hesaplamaları 67
5.3 Teleskobik Mekanizmanın Yapısal Analizi 71
5.4 Paralel Çeneli Robotik Tutucu Tahrik Sisteminin Yapısal Analizi 73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **76**
KAYNAKLAR **81**
ÖZGEÇMİŞ **83**

KISALTMALAR

HER : Hava Envanter Robotu
IOT : Nesnelerin İnterneti
MST : Mekatronik Sistem Tasarımı
ODES : Otomatik Depolama ve Erişim Sistemleri
OMR : Otonom Mobil Robotu
OYA : Otonom Yönlendirmeli Araçlar
PID : Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Kontrol Döngüsü
RFID : Radyo Frekansı ile Tanımlama Teknolojisi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1: Mobil Depo Robotunun Tasarım Hedef Parametreleri 29
Çizelge 3.2: Gerçekleştirilen Tasarımların Sonuç Parametreleri 36
Çizelge 5.1: Makaslı Kaldırma Sisteminin Hesaplama Ağının Model Parametreleri……..57
Çizelge 5.2: Statik Yapısal Analiz Modeli Malzeme Özellikleri 57
Çizelge 5.3: Taşıyıcı Plaka Tasarımı Analiz Parametreleri 61
Çizelge 5.4: Analiz Sonuçları ve Analitik Hesaplama Karşılaştırma Tablosu 73
Çizelge 5.5: Hesaplama Ağı Modeli Özellikleri 74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Endüstri 4.0'ın Alt Bileşenleri 1
Şekil 1.2: Depo İstifleme Robotları [4] 2
Şekil 1.3: Otonom Forkliftler [5] 3
Şekil 1.4: Otonom Envanter Robotları [6] 4
Şekil 1.5: Hava Envanter Robotları [9] 5
Şekil 2.1: "Barrett Electronics of Northbrook" Firmasının Geliştirdiği OYA Robotu [10]....6
Şekil 2.2: Otomatik Depolama ve Erişim Sistemleri [11]..... 7
Şekil 2.3: "INVIA" Firmasının Geliştirdiği Otonom Mobil Depo Robotu [14]..... 8
Şekil 2.4: Mobil Robot Depo İçi Operasyon Gösterimi [15] 9
Şekil 2.5: "INVIA" Firmasının Geliştirdiği Mobil Depo Robotunun Genel Mekanik Tasarım Bölümleri [16] 9
Şekil 3.1: Otonom Mobil Robotun Mekanik Tasarım Aşamaları……...11
Şekil 3.2: Otonom Mobil Depo Robotunun Mekatronik Tasarım Aşamaları 12
Şekil 3.3: Otonom Mobil Depo Robotunun Mekatronik Sistem Tasarımı (MST)..... 13
Şekil 3.4: Tasarım Gerekleri Ana Katmanları ve Alt Katmanları..... 14
Şekil 3.5: Tasarım Gerekleri Alt Katmanları ve İlişkili Katmanların 14
Şekil 3.6: Robotun Açık Durumdaki Genel Ölçüleri 15
Şekil 3.7: Mobil Depo Robotunun Kapalı Durumdaki Genel Ölçüleri 16
Şekil 3.8: Mobil Depo Robotunun Kapalı Durumdaki Genel Ölçüleri 16
Şekil 3.9: Mobil Depo Robotunun Alt Komponentleri..... 17
Şekil 3.10: Mekanik Şasi Alttan Görünüş..... 18
Şekil 3.11: Mekanik Şasi Teknik Resim Kesit Görünüş..... 19
Şekil 3.12: Robotun Saat Yönü Tersine Dönme Hareketi, Diferansiyel Sürüş Tekerlek konfigürasyonu 20
Şekil 3.13: LINIX 85ZY24 DC Motoru 21
Şekil 3.14: LINIX 85ZY24 DC Motor Teknik Özellikleri 22
Şekil 3.15: Makaslı Kaldırma Sistemi Serbest Cisim Diyagramı [19]..... 22
Şekil 3.16: Makaslı Kaldırma Sisteminin Alt Komponentleri..... 23
Şekil 3.17: Vidalı Mile Etkiyen Kuvvetler..... 24
Şekil 3.18: Tasarlanan Makaslı Kaldırma Sistemine Etkiyen Kuvvetler..... 24
Şekil 3.19: Teleskobik Mekanizma Sisteminin Alt Komponentleri-1..... 25
Şekil 3.20: Teleskobik Mekanizma Sisteminin Alt Komponentleri-2..... 26
Şekil 3.21: Teleskobik Mekanizmaya Etkiyen Kuvvetler..... 26
Şekil 3.22: Robotik Tutucu Sistem Çeşitleri 27
Şekil 3.23: Elektrik Motorları İle Çalışan Tutucular İçin Temel Tasarım Stratejileri..... 28
Şekil 3.24: Paralel Çeneli Robotik Tutucunun Hedef Nesneyi Kavrama Uygulaması (9. Ürün tepsisi, 12. Paralel çene, 10. Nesne, 11. Dikey ön çene) 29
Şekil 3.25: Paralel Çeneli Robotik Tutucu Sistem Tasarımları 29
Şekil 3.26: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Alt Komponentleri (a. Pinyon Dişli, b. Servo Motor, c. Çene-1, d. Çene-2, h. Uzuv-2, f. Kremayer Dişli Parça, g. Uzuv-1, h. Uzuv-2, ı. Çene-2 Pinyon Dişli) 30

Şekil 3.27: Birinci Robotik Tutucu Tasarımı Uygulanan Kuvvetler 31
Şekil 3.28: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-1 32
Şekil 3.29: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-2 33
Şekil 3.30: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Alt Komponentleri (a. Çene-1 pinyon dişli, b. Kremayer Dişli, c. Çene-1, d. Çene-2, e. Kılavuz Parça, f. Uzuv-2, g. Uzuv-1, h. Paralel Çene) 33
Şekil 3.31: İkinci Robotik Tutucu Tasarımı Yatay Yönde Etkiyen Kuvvetler 34
Şekil 3.32: M995 Servo Motor Teknik Özellikleri 35
Şekil 3.33: İkinci Robotik Tutucu Tasarımı Dikey Yönde Etkiyen Kuvvetler 35
Şekil 3.34: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-1 36
Şekil 3.35: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-2 36
Şekil 3.36: Mobil Depo Robotu Elektrik-Elektronik Kontrol Şeması 37
Şekil 3.37: Enkoder 38
Şekil 3.38: Enkoder Mekanik Şasi Montaj Yerleşimi 38
Şekil 3.39: Ultrasonik Mesafe Sensörü 39
Şekil 3.40: Kontrolcü Kartı Sensör Girişleri Devre Şeması 39
Şekil 3.41: Teleskobik ve Kaldırma Mekanizması Tahrik Motorları Devre Şeması 40
Şekil 3.42: Robotik Tutucu Sistem Tahrik Motorları Devre Şeması 41
Şekil 3.43: Diferansiyel Tahrikli Mobil Robotun Hareket Parametreleri [23] 42
Şekil 3.44: Mobil Robot Kontrol Sistemi Blok Diyagramı [23] 42
Şekil 3.45: Mobil Robotun Hareket Kontrol Modeli 44
Şekil 3.46: Mobil Robotun Tekerlek Kontrol Modeli 45
Şekil 3.47: Mobil Robotun Rota Açısı Kontrol Modeli 45
Şekil 3.48: MATLAB-Simulink "DeadReckoningLogic" Kontrol Bloğu 46
Şekil 3.49: MATLAB-Simulink "DeadReckoningLogic" Kontrol Bloğunun İç Döngüsü 47
Şekil 3.50: Mobil Robotun Hareket Simülasyonu 48
Şekil 3.51: Kontrol Edilen Mesafe Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi 49
Şekil 3.52: Kontrol Edilen Doğrusal Hız Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi 49
Şekil 3.53: Kontrol Edilen Açısal Hız Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi 50
Şekil 3.54: Kontrol Edilen Sağ ve Sol Enkoder Pulse Değerlerinin Zamana Bağlı Değişimi 50
Şekil 4.1: Sistem Entegrasyonu Sağlanan Mobil Robotun Prototipi 51
Şekil 4.2: Mekanik Şasi Prototip Montajı 52
Şekil 4.3: Poliüretan Kaplı Tekerlek 52
Şekil 4.4: Teleskobik Mekanizma Hareket Fonksiyon Testi : (a) Kapalı Konum. (b) Orta Konum. (c) Açık Konum. 53
Şekil 4.5: Teleskobik Mekanizma Kutu Hareket Fonksiyon Testi : (a) Kutu Alınmadan Önceki Konum. (b) Kutu Alınma Sırasındaki Konum. (c) Kutu Alındıktan Sonraki Konum 53
Şekil 4.6: Kaldırma Mekanizmasının Hareket Kontrolü Testi 54
Şekil 4.7: Robotik Tutucu Sistemin Dikey ve Yatay Kremayer Dişli Uygulaması : (a) Dikey Uygulama. (b) Yatay Uygulama 55
Şekil 4.8: Robotik Tutucu Sistem Prototipi : (a) Kutu Kavrama Hareketi. (b) Maksimum Kavrama Ölçüsü 55
Şekil 5.1: Birinci Makas Tasarımı 56
Şekil 5.2: İkinci Makas Tasarımı 56
Şekil 5.3: Makaslı Kaldırma Sisteminin Hesaplama Ağı Modeli 57

Şekil 5.4: Makaslı Kaldırma Sistemi Statik Yapısal Analiz Modeli 58
Şekil 5.5: Analiz Modeli Sınır Koşulu Bağlantı Tipleri 58
Şekil 5.6: İkinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı 59
Şekil 5.7: Birinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı 59
Şekil 5.8: İkinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı 60
Şekil 5.9: Birinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı 60
Şekil 5.10: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Hesaplama Ağı Modeli 60
Şekil 5.11: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Statik Yapısal Analiz Modeli 61
Şekil 5.12: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı ... 61
Şekil 5.13: Teleskobik Mekanizma Kesme Kuvveti Diyagramı 62
Şekil 5.14: Teleskobik Mekanizma Yandan Görünüş Teknik Resmi 62
Şekil 5.15: Teleskobik Mekanizma Önden Görünüş Teknik Resmi 63
Şekil 5.16: Birinci Bom Yapısının Kesme Kuvveti Diyagramı 63
Şekil 5.17: U kesitli Yapının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması 64
Şekil 5.18: L Kesitli Yapının Atalet Moment Hesabı İçin Boyutlandırılması 65
Şekil 5.19: İkinci Bom Yapısının Kesme Kuvveti Diyagramı 67
Şekil 5.20: U kesitli İkinci Bom Yapısının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması 68
Şekil 5.21: L kesitli İkinci Bom Yapısının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması 69
Şekil 5.22: Teleskobik Mekanizmanın Hesaplama Ağı Modeli 71
Şekil 5.23: Teleskobik Mekanizmanın Analiz Modeli Sınır Koşulları 71
Şekil 5.24: Teleskobik Mekanizma Statik Yapısal Analiz Sonucu Maksimum Gerilme Dağılımı 72
Şekil 5.25: Teleskobik Mekanizma Statik Yapısal Analiz Sonucu Maksimum Gerilme Dağılımı 73
Şekil 5.26: Robotik Tutucunun Analiz Modeli Sınır Koşulları 74
Şekil 5.27: Robotik Tutucunun Hesaplama Ağı Modeli 74
Şekil 5.28: Kremayer Pinyon Dişli Yapısının Gerilme Dağılımı 75
Şekil 5.29: Kılavuzlama Bölgesi Gerilme Dağılımı 75

OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

ÖZET

Endüstri 4.0 ile birlikte dijitalleşme alanında gerçekleşen yenilikler tüketim alışkanlıklarının değişmesine sebebiyet vermiştir. Değişen tüketim ve yaşam alışkanlıklarımızın bir sonucu olarak e-ticaret ve bu ticaret yöntemine uygun endüstriyel depo yönetim sistemlerine olan önem artmıştır. Bununla birlikte e-ticaret sitelerine artan talebin sonucu olarak ortaya çıkan rekabet ortamı tedarik süresini de en az tedarik edilen ürünün kalitesi kadar önemli hale getirmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak geleneksel depo yönetim sistemleri de hızla değişen tüketim alışkanlıklarını karşılayabilmek için sabit ve büyük bütçeli makine otomasyonları yerine mobilize olabilen yapılar üzerinden karşılanmaya başlanmıştır. Endüstri 4.0'ın makine otomasyonu alanında getirdiği yenilikçi yaklaşımların sonucu olarak yapay zeka algoritmaları ile donatılmış makinalar geliştirilmeye başlanmıştır, bu durum da otonom mobil robotların dijitalleşen depo yönetim sistemlerinde önemini arttırmaya başlamıştır. Otonom mobil robotlar (OMR), endüstriyel sektör için en yenilikçi otomasyon çözümleri sunan yapılardır. Depo yönetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan robot sınıfları, otonom yönlendirmeli araçlar (OYA) ve otomatik depolama ve erişim sistemleri (ODES) olarak gösterilebilir. Otonom yönlendirmeli araçlar (OYA) daha çok depo otomasyon senaryosu belirlenmiş statik durumlar için kullanılan depo robotlarıdır, depo otomasyon senaryolarında oluşabilecek değişiklikler robot konumları ve robot seyahat hatlarının yeniden yapılandırılması ile karşılanmaktadır. Bu durum dinamik olarak değişebilen ve zaman yönetiminin kritik öneme sahip olduğu depo yönetimlerinde ek zaman ihtiyacına sebebiyet vererek depo yönetiminin daha yavaş ilerlemesine sebebiyet vermektedir. Otonom mobil robotlar (OMR) otonom yönlendirmeli araçlardan (OYA) farklı olarak dinamik olarak değişebilen depo ortamlarına hızlı bir şekilde adapte olabilen yapıları ile ayrılarak, depo yönetim sistemlerine büyük bir yenilik ve rekabet seçeneği sunmaktadır. Bunun yanında depo yönetimi için gerekli olabilen özel görevleri dinamik olarak adapte olabilen yapıları sayesinde yerine getirebilmektedirler. Depo yönetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir diğer depo robotu olan otomatik depolama ve erişim sistemleri (ODES), otonom yönlendirmeli araçlar (OYA) ve otonom mobil robotlara (OMR) göre daha statik depo koşulları için tasarlanıp depo entegrasyon işlemleri yapılmaktadır. Otomatik depolama ve erişim sistemlerinin depo çalışma ortamına entegrasyon işlemi için gerekli olan ilk yatırım maliyeti en yüksek depo robotu sınıfıdır. Depo yönetim senaryosu içerisinde gerçekleşebilecek değişiklikler, yüksek bütçeli tasarım entegrasyonları ve çoğu zaman depoların belli süreler içerisinde operasyon durdurmalarına sebebiyet verebilecek zaman ihtiyaçları ile karşılanmaktadır. İlk yatırım maliyeti yüksek ve değişebilen depo ortamlarına karşı düşük esneklik gösteren otomatik depolama ve erişim sistemlerine (ODES) göre, çalışma ortam koşulları değişikliklerine kolay adapte olabilen ve görece daha düşük maliyet gerektiren yapıları ile otonom mobil robotlar (OMR) endüstride rekabet seçeneği sunmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, endüstriyel depolarda istifleme işlemlerini gerçekleştirebilecek otonom mobil depo robotunun mekatronik sistem tasarım süreçlerinin geliştirilmesi ve bu süreçlerle ilgili yenilikçi çözümlerin getirilmesi amaçlanmıştır. Depo çalışma ortamı içerisinde mobil robottan istenebilecek görevler hareket fonksiyonları üzerinden tanımlanıp bu gereksinimleri karşılayabilecek mekanik sistemler gerçekleştirilmiştir. Depo içerisinde mobil robottan istenen sistem gereksinimleri, belirli koordinatlar arasında insan kontrollü olmadan seyahat edebilmek, farklı yükseklikte bulunabilen hedef nesnelere erişim sağlayabilmek, hedef nesneleri belirli koordinatlar arasında taşıyabilmek şeklinde belirlenmiştir. Mobil depo robotu için belirlenen sistem ihtiyaçları doğrultusunda mekanik tasarımlar gerçekleştirilirken tasarlanan mekanik yapının, en az yer kaplayacak şekilde, dayanaklı ve optimum ağırlık mertebesinde olmasına özen gösterilmiştir. Mekanik sistemlerin kontrolü geliştirilen elektrik-elektronik sisteme entegre edilmiş kontrol sistemi ile sağlanmıştır. Elektrik-elektronik komponentler geliştirilen mekanik sistem ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde seçilmiştir. Mobil robot hareket denklemlerine göre geliştirilen kontrol yazılımı ile mobil depo robotunun tüm mekanik sistemlerinin kontrol edilebildiği görülmüştür. Mobil robotun fiziksel sistem entegrasyonu sağlanmadan önce robot hareketleri kontrol yazılımda gerçekleştirilen simülasyon ile öngörülebilmektedir. Otonom mobil depo robotunun sahip olduğu hareket mekanizmaları ve elektrik-elektronik kontrol sistemi sayesinde depo içerisinde istenilen farklı görevler için farklı kontrol senaryoları ile birlikte farklı hareket fonksiyonlarını gerçekleştirilebilir.

Otonom mobil depo robotu mekanik, elektrik-elektronik ve kontrol olmak üzere üç adet alt sistemden oluşmaktadır. Mekanik alt sistem teleskobik mekanizma, makaslı kaldırma sistemi, mekanik şasi ve robotik tutucu sistem olmak üzere kendi içerisinde dört adet alt sisteme ayrılmaktadır. Mekanik şasi alt sistemi üzerinde bulunan ağırlığı taşıyabilmek ve üzerinde taşıdığı sistemler ile birlikte istenilen koordinatlar arasında seyahat edebilmek için tasarlanmıştır. Mekanik şasi hareketi diferansiyel tip tahrik mekanizması ile sağlanmıştır. Diferansiyel tahrik mekanizması, mobil depo robotunun depo içerisindeki kısıtlı alanlarda manevra kabiliyetine sahip olması için geliştirilmiştir. Diferansiyel tahrik mekanizması iki adet bağımsız motor ile sürülebilen tekerlek ve iki adet tahrik edilmeyen tekerlekten oluşmaktadır. Motorlarda oluşturulan dönme momenti düz konik dişliler kullanılarak 90° iletilerek rulmanlar ile yataklaması yapılmış mil üzerine montaj edilmiş tekerleklere iletilir. Mekanik şasi ST-37 standardına uygun sac levha malzemenin sac levha büküm işlemi gerçekleştirilerek imalatı gerçekleştirilmiştir. Mekanik şasi 630×700×220 mm^3 hacim ölçülerine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Mekanik şasinin üzerinde makaslı kaldırma sistemi, teleskobik mekanizma ve paralel çeneli robotik tutucu sistemi bulunmaktadır. Mekanik şasi üzerinde bulunan makaslı kaldırma sistemi farklı yüksekliklerde bulunabilen hedef nesnelere ulaşabilmek için geliştirilmiştir. Makaslı kaldırma sistemi çapraz olarak birbiri üzerine montaj edilmiş makas parçalarından oluşur. Bir adet tahrik motoru kullanılarak elde edilen dönme momenti vidalı mil ve somunu kullanılarak doğrusal harekete çevrilir. Elde edilen doğrusal hareket makas yapılarına iletilerek kaldırma kuvveti elde edilmiş olur. Kaldırma mekanizmasının tahrik sistemi parametreleri analitik metot kullanılarak hesaplanmıştır. Analitik metot kullanılarak elde edilen kuvvetler kullanılarak kaldırma sisteminin statik yapısal analiz modeli gerçekleştirilmiştir. İki farklı makas yapısının statik yapısal analizleri gerçekleştirilerek sistem için en uygun makas yapısı araştırılmıştır. Makaslı kaldırma sisteminin üst platformunda yer alan teleskobik mekanizma, depo raflarında farklı konumlarda bulunabilen hedef

nesnelere erişimi sağlamak için geliştirilmiştir. Teleskobik mekanizma birbiri üzerinde hareket edebilen üç adet bom yapısından oluşur. Birinci bom yapısı sistem üzerinde sabit olarak bulunurken, diğer iki bom yapısı birbiri üzerinde hareket ederek uzama ve kısalma hareketini yapmaktadır. Bir adet motor ile tahrik edilen pinyon dişli üzerinde oluşturulan dönme momenti triger kayışına iletilerek triger kayışı üzerinde doğrusal hareket elde edilmiştir. Triger kayışı üzerinde elde edilen doğrusal hareket bağlantı braketi parçaları ile diğer yapılara iletilerek hareket mekanizması oluşturulmuştur. Teleskobik mekanizmanın tahrik sistemi parametreleri analitik metot kullanılarak hesaplanmıştır. Teleskobik mekanizma üzerinde bulunan taşıyıcı parçaların moment kuvvet diyagramı çıkartılarak, mesnet bölgelerine etkiyen kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Analitik metot ile hesaplanan mesnet kuvvet değerleri kullanılarak mesnet bölgelerinde oluşan gerilme miktarları hesaplanmıştır. Kuvvet moment diyagramından elde edilen kuvvet değerleri kullanılarak teleskobik mekanizmanın statik yapısal analiz modeli oluşturulmuştur. Analiz sonucu elde edilen gerilme değerleri ile analitik metot ile hesaplanan gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Teleskobik mekanizmanın ucunda yer alan robotik tutucu sistem, hedef nesneyi kavrayarak ürün tepsisi üzerine alma ve hedef koordinata bırakma hareketlerini sağlayabilmek için geliştirilmiştir. Hedef kutu ölçülerini kavrayacak şekilde iki farklı robotik tutucu sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. İki farklı robotik tutucu sistem tasarımının tahrik sistemi parametreleri analitik metot ile hesaplanmıştır. Analitik metot ile hesaplanan maksimum kuvvet değerleri uygulanarak robotik tutucu sistem için statik yapısal analiz modeli geliştirilmiştir. Analiz sonucu robotik tutucu sistem tasarımını kritik bölgelerinde görülen gerilme değerleri karşılaştırılarak mobil robot için en uygun robotik tutucu sistem tasarımı belirlenmiştir. Mekanik şasi üzerinde konumlanan mekanizmalar mobil robot kapalı konumda iken minimum ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Geliştirilen mekanik alt sistemlerin hareket kontrolleri, elektrik-elektronik alt sistem ve kontrol alt sistem tasarımları gerçekleştirilerek sağlanmıştır. Mobil robotun hareket denklemleri analitik olarak belirlenip kontrol yazılımına entegrasyonu gerçekleştirilmiştir. Mobil robot hareket simülasyonları gerçekleştirilerek robotun çalışacağı çevre koşullarındaki hareket manevra kabiliyeti incelenmiştir. Mekanik alt sistemlerin analitik ve sayısal analizleri gerçekleştirilerek, mekanik sistemlerin çalışırken sahip olacağı güvenlik limitleri belirlenmiştir. Maksimum 684 mm uzaklığa erişim sağlayabilen, 819 mm yükseklik değerlerine ulaşabilen, maksimum 194×414×188 mm^3 hacim ve 1 kg ağırlık değerlerine sahip nesneleri taşıyabilen mobil depo robotunun prototip üretimi gerçekleştirilip, hareket fonksiyonu testleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Otonom Robotlar, Mobil Depo Robotları, Robotik Tutucu Sistem, Teleskobik Mekanizma, Makaslı Kaldırma Mekanizma*

MECHATRONIC SYSTEM DESIGN OF THE AUTONOMOUS WAREHOUSE MOBILE ROBOT

ABSTRACT

Innovations in the field of digitalization with Industry 4.0 led to changes in consumption habits. As a result of changing habits in consumption and lifestyle, the importance of e-commerce and industrial warehouse management systems suitable for this trading method has increased. However, the competitive environment that emerged as a result of the increasing demand for e-commerce sites made the procurement time as important as the quality of the product supplied. As a result of this situation, traditional warehouse management systems have been started to be met through mobilized structures instead of fixed and large-budget machine automatons in order to meet rapidly changing consumption habits. As a result of the innovative approaches brought by Industry 4.0 in the field of machine automation, machines equipped with artificial intelligence algorithms have begun to be developed, which has increase the importance of autonomous robots in digitalized warehouse management systems. Autonomous Mobile Robots (AMR) provide the most innovative automation solutions for warehouse management. Robot classes commonly used in warehouse management systems can be represented as Autonomous Guided Vehicles (AGV) and Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS). Autonomous Guided Vehicles (AGV) are warehouse robots that used mostly for static situations with warehouse automation scenarios, changes that may occur in warehouse automation scenarios are met by the reconstruction of robot positions and robot travel lines. This situation causes additional time requirement in warehouse managements, which can change dynamically and where time management is critical, causing the warehouse management to progress more slowly. What differentiates Autonomous Mobile Robots (AMR) from the widely used Autonomous Guided Vehicles (AGV) is their ability to adapt to special/varied tasks in a fast and efficient manner within diverse warehouse environments. In addition, they can perform special tasks that may be required for warehouse management with their dynamically adaptable structures. Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS), another warehouse robot commonly used in warehouse management systems, are designed for more static warehouse conditions compared to Autonomous Guided Vehicles (AGV) and Autonomous Mobile Robots (AMR). The first investment cost required for the integration of Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) into the warehouse working environment is the highest warehouse robot class. Changes that may take place within the warehouse management scenario are met with high-budget design integrations and time needs that can often cause warehouse to stop operating within a certain period of time. The AMR offers a better alternative for innovation and competition. Compared to the Automated Storage and Retrieval Systems (AS/RS) which have a high initial investment cost and show low flexibility in changing warehouse environments, Autonomous Mobile Robots (AMR) offers a more competitive option in the industry with its ability to easily adapt to changes in diverse warehouse environments requiring comparably lower costs.

It is aimed to develop the mechatronic system design processes and to bring innovative solutions related to these processes. The tasks that can be requested from the mobile robot within the warehouse working environment have been defined through the motion functions and mechanical system have been designed to meet these requirement. The system requirements requested from the mobile robot within the warehouse were determined to be able to travel between certain coordinates without human control, to access target objects that can be located at different heights, and to move target objects between certain coordinates. While making mechanical design in line with the system requirements determined for the mobile warehouse robot, it has been paid attention that the designed mechanical structure is durable and at the optimum weight level in a minimum space. The control of the mechanical system was provided by the control system integrated into the developed electrical-electronic system. Electrical-electronic components are selected to meet the needs of the developed mechanical system. It has been seen that all the mechanical systems of the mobile warehouse robot can be controlled with the control software developed according to the mobile robot motion equations. Before the physical system integration of the mobile robot is ensured, robot movements can be predicted with the simulation performed in the control software. Mechanical chassis ST-37 standard sheet metal material was manufactured by performing the sheet metal forming method. The Mechanical chassis is designed to have 630×700×220 mm^3 volume dimensions. With the movement mechanisms capabilities of the autonomous mobile robot, different motion functions can be realized with different control scenarios for different tasks desired within the warehouse.

The autonomous mobile warehouse robot consists of three subsystems: mechanical, electrical-electronic and control. The mechanical system is divided into four subsystems within itself: the telescopic mechanism, scissor lift system, mechanical chassis and the robotic gripper system. It is designed to carry the weight on the mechanical chassis sub-system and to travel between the desired coordinates with the systems it carries. Mechanical chassis movement is provided by differential type drive mechanism. The differential drive mechanism has been developed so that the mobile warehouse robot has maneuverability in restricted areas within the warehouse. The differential drive mechanism consists of two independent motors, wheels and two non-driven wheels. The torque generated in the motors is transmitted 90° using straight bevel gears and transmitted to the wheels mounted on the shaft mounted with bearings. There is a scissor lift system, telescopic mechanism and a parallel jaw robotic gripper system on the mechanical chassis. The scissor lift system on the mechanical chassis has been developed to reach target objects that can be found at different heights. The scissor lift system consists of scissor pieces that are mounted on each other diagonally. The torque obtained by using a drive motor is converted into linear motion using the ball screw and nut. Lifting force is obtained by transmitting the obtained linear motion to the scissor structures. The drive system parameters of the lifting mechanism are calculated using the analytical method. The static structural analysis model of the lifting system was carried out using the forces obtained by using the analytical method. Static structural analysis of two different scissor structures were carried out and the most suitable scissor structure was investigated for the system. The telescopic mechanism consists of three boom structures that can move on the top of each other. While the first boom structure is fixed on the system, the other two boom structures move on each other and make the elongation and shortening motion. The torque generated on a pinion gear driven by a motor is transmitted to the timing belt and linear motion is obtained on the timing

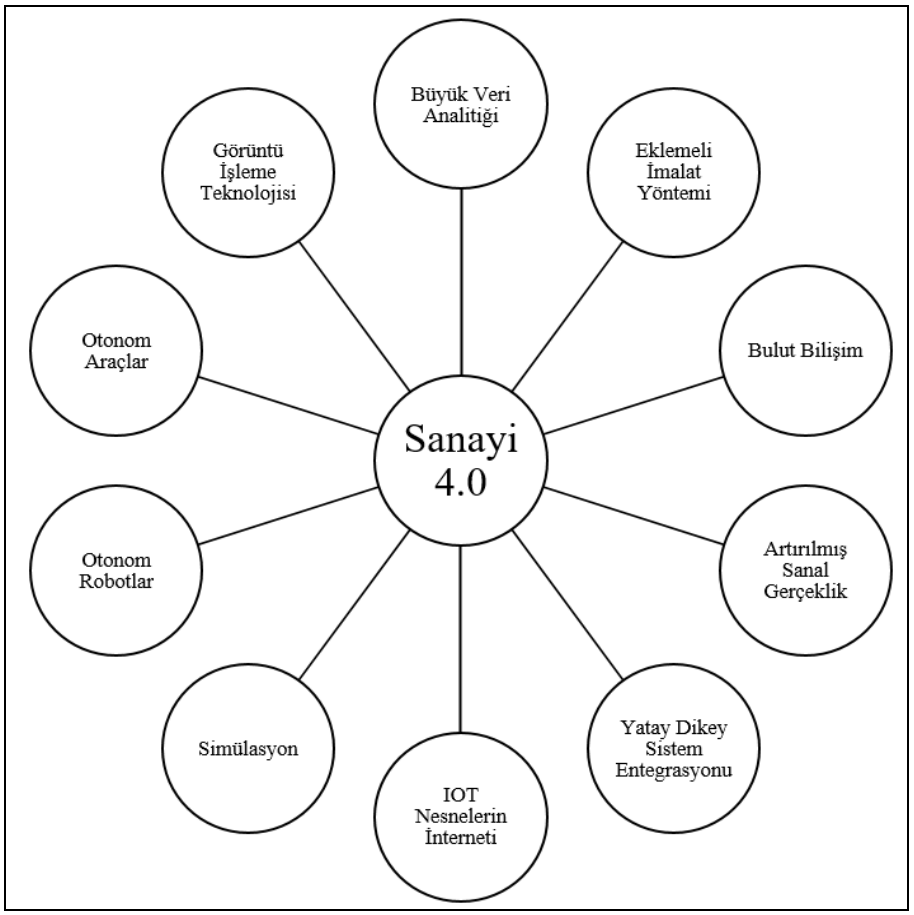
belt. The movement mechanism is created by transmitting the linear motion obtained on the timing belt to other structures with the connection bracket parts. The drive system parameters of the telescopic mechanism are calculated using the analytical method. By drawing the moment force diagram of the carrier parts on the telescopic mechanism, the force values affecting the bearing areas are calculated. Stress amounts occurring in the bearing regions were calculated by using the bearing force values calculated with the analytical method. The static structural analysis model of the telescopic mechanism was created by using the force values obtained from the force moment diagram. The stress values obtained as a result of the analysis and the stress values calculated with the analytical method were compared. The telescopic mechanism on the upper platform of the scissor lift system has been developed to provide access to target objects that can be located in different positions on the warehouse racks. The robotic holding system at the end of the telescopic mechanism has been developed in order to grasp the target object and provide picking and releasing movements on the product tray. Two different robotic gripper systems have been designed to grasp the target box dimensions. The drive system parameters of two different robotic gripper system designs were calculated by analytical method. A static structural analysis model has been developed for the robotic gripper system by applying the maximum force values calculated with the analytical method. As a result of the analysis, the most appropriate robotic gripper system design for the mobile robot was determined by comparing the stress values observed in the critical regions of the robotic holder system design. Mechanisms located on the mechanical chassis are designed to have minimum dimensions when the mobile robot is in the closed position. Movement controls of the developed mechanical subsystems are provided by designing electrical-electronic subsystem and control subsystem. The motion equations of the mobile robot were determined analytically and integrated into the control software. Movement controls of the developed mechanical subsystem are provided by designing the electrical-electronic subsystem and control subsystem. The analytical and numerical analyzes of the mechanical subsystem were carried out and the safety limits that the mechanical system would have while working were determined. Movement experiments were carried out by making prototype production of the mobile warehouse robot, where the mechatronic system was designed. The prototype production of the mobile warehouse robot which can reach a maximum distance of 684 mm, can reach 819 mm height values and carry objects with a maximum volume of 194×414×188 mm^3 and weight of 1kg, has been carried out and motion function tests have been conducted.

Keywords: *Autonomous Robots, Mobile Warehouse Robots, Robot Gripper System, Telescopic Mechanism, Scissor Lift Mechanism*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışmanın Konusu

Endüstri 4.0 ağırlıklı olarak otomasyon, makine öğrenimi ve gerçek zamanlı data iletimi gibi çalışma konularına yoğunlaşan sanayi devriminin bir aşaması olarak tanımlanabilir. IOT ve akıllı üretim konularını kapsayan Endüstri 4.0, üretim ve tedarik zinciri yönetimine odaklanan şirketlere akıllı dijital teknoloji ile entegre olabilen bir çalışma ekosistemi sunar. Endüstri 4.0'ın görüntü işleme teknolojisi, otonom robotlar gibi alanlarda getirdiği teknolojik yenilikler, akıllı depo yönetim sistemlerine entegre edilerek rekabetçi çözümler geliştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere Endüstri 4.0'ın bir alt bileşeni de otonom mobil robotlardır [1].



Şekil 1.1: Endüstri 4.0'ın Alt Bileşenleri

Değişen depolama sistemlerinde operasyon maliyetini azaltmak adına insan kontrolü yerine sürücüsüz forkliftler, mobil robotlar gibi daha mobilize olan yapıları itibariyle daha verimli ve daha hızlı süreç yönetimleri gerçekleştirebilen otonom sistemlere duyulan ihtiyaç artmıştır. “U.S. Census Bureau” firmasının yaptığı analiz verilerine göre depo yönetim süreçlerinin emek yoğun bir şekilde ilerlemesi ortalama bir depo çalışanının yılda yaklaşık yedi haftalık iş gücü israfına sebep olmaktadır, bu durum da işçilikte her yıl 4,3 milyar dolardan fazla zarar edilmesine sebebiyet vermektedir. İş verimliliği ile birlikte depolardaki mobil robotik uygulamalar depolardaki araç ve insan trafiğini birbirinden ayırarak tesis içindeki güvenlik sorunlarını minimize etmektedir [2]. Depo robotları daha etkin hale geldikçe, maliyetleri düşer ve her depoya uyarlanabilir tasarımları ile depo yönetim sistemlerine yeni verimlilik çözümleri sunar [3]. Depo yönetim sistemlerinde günümüzde sensör teknolojisi ve yapay zekâ algoritmaları ile geliştirilmiş dört adet sürücüsüz araç sınıfı bulunmaktadır.



Şekil 1.2: Depo İstifleme Robotları [4]

Şekil 1.2’de “Grey Orange” firmasının geliştirdiği, depo ürün yerleşim süreçlerinde kullanılan otonom depo robotu görülmektedir. Depo istifleme robotları bu tip sürücüsüz araçlardan ilki olarak tanımlanabilir. ”IAM Robotics”, ”Grey Orange” ve

“Bleum” gibi firmalar bu tip robotların üretimini gerçekleştirmektedir. Bu makinalar tipik olarak depodaki ürünlerin işçiler ile otomasyon hatları arasında taşınabilmesi için depodaki esnek rotalarda seyahat edebilecek şekilde programlanabilirler.



Şekil 1.3: Otonom Forkliftler [5]

İkinci tip sürüsüz araçlar sınıfları otonom forkliftler olarak tanımlanabilirler. Şekil 1.3’de Linde firmasının geliştirdiği otonom forklift sürücüsüz aracı görülmektedir. Sürücüsüz forkliftlerde navigasyon lazer sensörü, ön ve arka tarayıcılar, 3D kamera ve içerisinde insan bulunan depoda güvenli olarak dolaşmasını sağlamak için gerekli sesli uyarı göstergeleri bulunmaktadır. Aynı zamanda gerçek zamanlı olarak engelleri tespit edebilmekte ve gerektiğinde rota değişiklikleri yapabilmektedir. Genellikle manuel olarak çalıştırılan forkliftler ile birlikte özel depo operasyonlarında kullanılmaktadır.



Şekil 1.4: Otonom Envanter Robotları [6]

Üçüncü tip sürücüsüz araç sınıfları otonom envanter robotları olarak tanımlanabilirler. Bu tip robotlar depolarda stok takibi yaparlar. RFID etiketli ürün ve ekipman ile bir arada kullanıldıklarında depo tarafından belirlenen programlarda kendi envanterlerini kendileri belirleyebilirler [7]. İnsanlar genellikle her üç ayda bir envanter sayımı yapabiliyorken bu tip robotlar sayesinde her iki saatte bir gerçek zamanlı verilerle bu tip sayımlar yapılabilinmektedir. Şekil 1.4'de görülen Fetch firmasının ürettiği Tagsurveyor robotunda optimum kapsama alanı için monte edilmiş üç RFID sorgulayıcısı bulunmaktadır ve etiketli ürünleri 25 metre mesafeye kadar güvenilir ve tutarlı bir şekilde tespit etme yeteneğine sahiptir [8]. Bu tip robotlar sadece manuel stok sayım süreçlerini kısaltmakla kalmayıp, ürün depolama alanını kolayca görselleştirebildiği için depo yöneticilerine gerçek zamanlı depo haritaları sunabilir.



Şekil 1.5: Hava Envanter Robotları [9]

Dördüncü tip sürücüsüz araç sınıflarını hava envanter robotları olarak tanımlayabiliriz. Hava envanter robotları (HER) RFID tarama teknolojisi ile donatılarak gerçek zamanlı envanter taraması yapabilirler. Şekil 1.5'de PINC firmasının ürettiği normal çalışma saatleri dışında da konuşlandırılabilecek özelleştirilebilinir hava envanteri robotu görülmektedir. Hava envanter robotları operatörler tarafından otomatik envanter kontrolü yapabilmek ve eksik envanterleri görebilmek için programlanabilirler. Ortaya çıkan taramalar envanter yönetimi sistemleriyle senkronize edilebilen bir buluta yüklenip saklanabilirler. Hava envanter robotları donatıldıkları sensörler ve algoritmalar ile çarpışmaları önlediği gibi uçuş düzenlerini de ayarlayarak karmaşık ortamlarda gezinmeye olanak sağlar.

1.2 Tezin Amacı

Otonom hareket edebilen mobil robotların mekatronik tasarımı birçok farklı bilgi birikiminin entegrasyonunu içerir. Tez konusunun amacı depolarda kullanılabilecek mobil robotların mekatronik sistem tasarımlarını gerçekleştirmek ve mekanik tasarım süreçleri ile ilgili yenilikçi çözümler sunmaktır. Mobil depo robotundaki alt sistem mekanizmalarının sistem ihtiyaçları doğrultusundaki mekanik tasarımları yapılmış ve bilgisayar destekli simülasyon programları ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Robotun hareket kontrolü geliştirilen kontrol alt sistemi ile sağlanmıştır.

2. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTLARI

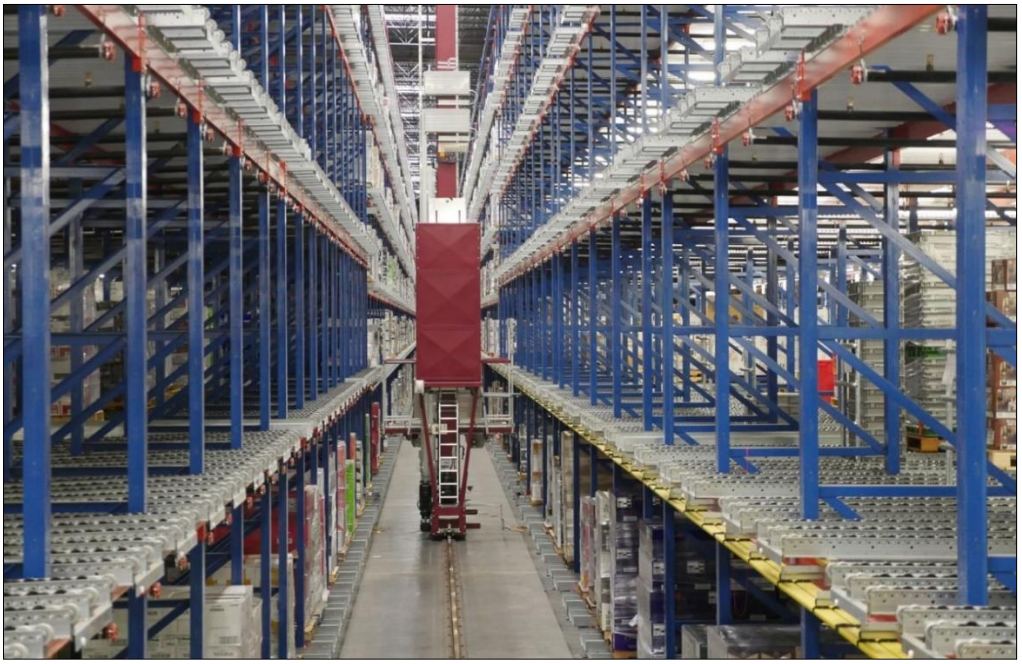
1950'li yıllarda sektörde ilk kullanılan mobil robotlar otonom yönlendirmeli araçlardır (OYA) ve günümüzde depo yönetim sisteminde verimliliği arttıran mobil depo robotlarının temelini teşkil ederler. Depolarda kullanılmak üzere sürücüsüz olarak ilk otonom depo robotları Şekil 2.1'de görüldüğü üzere "Barrett Electronics of Northbrook" firması tarafından geliştirilmiştir. Eski tasarımlar zemine çizili bulunan yolları takip etmekteydi, bir sonraki kuşak tasarımlarına sahip mobil depo robotları 1990 senesinin başlarında lazer sensörler ile yol tayini yapabilmeye başlamıştı. Depo içerisinde hareket eden bu robotlar herhangi bir sürücüye gerek duymadan günde 10, 15 mil mesafe gidebilmektedir. Önceden belirlenmiş olan bir yol üzerinde hızlanma ve yavaşlama hareket kontrollerini yapabildikleri ve engel tespit sistemlerine sahip oldukları için bu tip OYA sistemleri depo içerisinde güvenli taşıma görevlerini yerine getirmektedirler.



Şekil 2.1: "Barrett Electronics of Northbrook" Firmasının Geliştirdiği OYA Robotu [10]

Yakın zamana kadar depo içi otomatik ürün toplama görevlerini yerine getirebilecek tek sistem OYA sistemleri idi. Otonom yönlendirmeli araçlar (OYA), otomatik depolama ve erişim sistemleri (ODES) kadar olmasa da OMR robotlarına göre ilk yatırım maliyeti yüksek sistemlerdir. OMR robotları, ODES ve OYA sistemlerine göre daha zorlu görevleri yapıları gereği yerine getirebilmektedirler.

Geleneksel bir depoda, bir insanın depo raflarından hedef ürünleri alıp, paketleyip sonrasında sevk etmesi günde 1,6 km yürümesine sebebiyet vermektedir. Otomasyonlu depo istifleme sistemleri bu gereksiz aktiviteyi ortadan kaldırır. İnsanlara hangi ürünleri seçeceğini söyleyebilen yazılımlara sahip bu sistemler aynı zamanda istifleme hatalarını büyük ölçüde azaltarak verimliliği de arttırmaktadır. Şekil 2.2'de görülen sistemler genellikle ürünlerin depo içerisinde kayar mekanizmalar ve konveyörler ile istifleme işlemeni gerçekleştiren otomatik depolama ve erişim sistemleridir (ODES).



Şekil 2.2: Otomatik Depolama ve Erişim Sistemleri [11]

Otomatik depolama ve erişim sistemleri (ODES) depo yönetim süreçleri açısından verimlidir ancak maliyetleri çok yüksektir ve deponun yeniden yapılandırmasını gerektirir. Depoya sistem entegrasyonu uzun süreler aldığı için yatırım maliyeti yüksek depolama çözümleridir. Otomatik depolama ve erişim sistemlerinden (ODES) bir sonraki nesil sistemler otonom mobil depo robotları (OMR) olmuştur. Robotik firmaları depoda bağımsız hareket edebilen, engelleri tanımlayıp yol planlama yapabilen, depo içerisinde belirlenen görevleri yerine getirebilen, pilleri bittiği zaman otomatik olarak şarj istasyonlarına gidebilen depo robotları geliştirmişlerdir. Şekil 2.3'de "INIVIA" firmasının geliştirdiği otonom mobil robotlar (OMR) görülmektedir. Otonom mobil robotları (OMR) basit yazılım değişiklikleri ile farklı görev senaryoları için adapte edilebilirler. Depo içerisinde çalışacak otonom mobil robotların görevleri robot ara yüzünden geliştirilebildiği gibi

filo yazılımları üzerinden de geliştirilebilir. Filo yazılımları, birden çok depo robotunun kullanıldığı depo görevlerinde mobil robot pozisyon ve müsait olma durumlarına göre robotları birlikte en verimli şekilde çalışabilecekleri sıra düzenine koyar ve gerçek zamanlı görev düzenlemesini gerçekleştirir. Bu sayede depo çalışanları robotların depo içi görevleri belirleyip, yazılım üzerinden filo kontrollerini oluşturulduktan sonra, robotların çalışmalarını koordine etmek zorunda kalmazlar bu sayede daha yüksek değerli işlere yönelerek firma verimliliğini arttırmış olurlar [12].

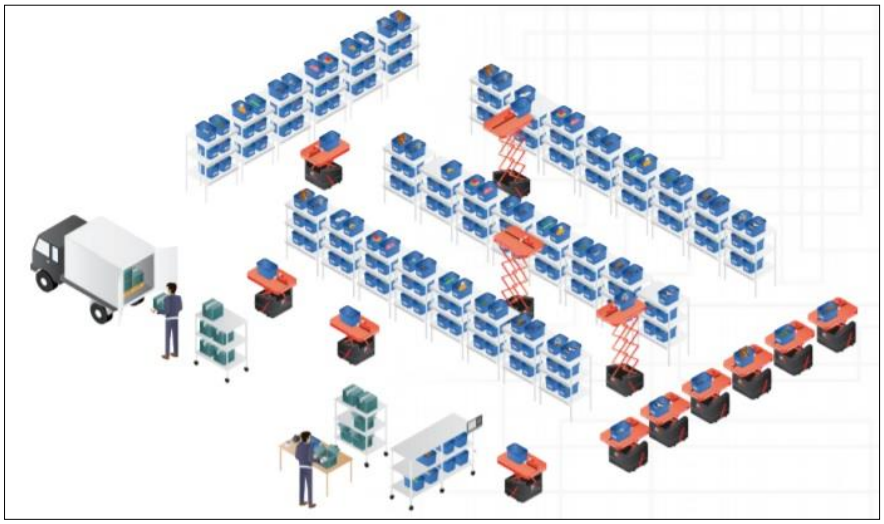
Otonom mobil robotu (OMR) depo içi ürün ve hat değişikliklerine karşı esnek ve entegre olabilen yapıya sahiptir. Bu yapıları itibari ile otonom mobil depo robotları modern depo yönetim sistemleri için çok önemlidir. Esnek entegre olabilen yapıları itibariyle farklı büyüklükteki depolar için de uyarlanabilirler [13].



Şekil 2.3: "INVIA" Firmasının Geliştirdiği Otonom Mobil Depo Robotu [14]

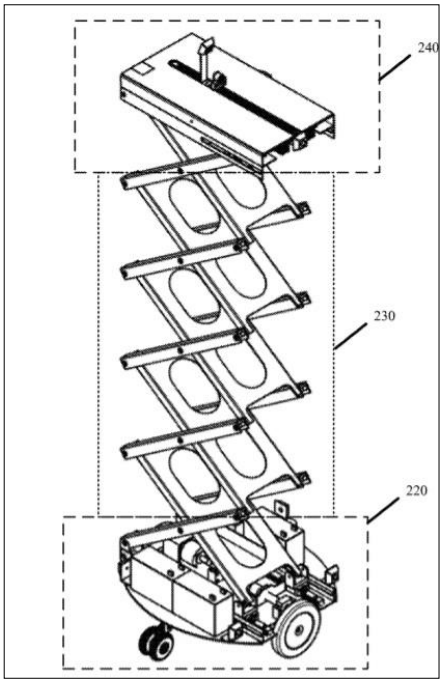
Yeni üretim hücreleri veya üretim operasyonları eklendiği durumlarda mobil depo robotları için depo içi haritasının yeniden oluşturulup robota hızlı ve kolayca yüklenerek, yeni çalışma koşulları için hızlıca devreye alınıp kullanılabilirler. Bu özellik robotun kullanılacağı yere robot fonksiyonlarının tam sahipliğini sağlar. Esnek olmayan otonom yönlendirmeli araç (OYA) yapılarına kıyasla, dinamik şartlara daha hızlı şekilde ayak uydurabilen yapıları itibariyle otonom mobil robotları

(OMR) kullanılarak, sık dinamik çalışma koşullarını değiştiren depolarda dahi depo hattının optimizasyonu sağlanabilir.



Şekil 2.4: Mobil Robot Depo İçi Operasyon Gösterimi [15]

Şekil 2.4'de depo içerisindeki mobil depo robotlarının çalışma düzeni görülmektedir. "INVIA" firmasının geliştirdiği mobil depo robotları nesneleri uzun mesafeler boyunca taşıyabilirler bu sayede sipariş karşılama oranını % 500 oranında arttırırlar [16].



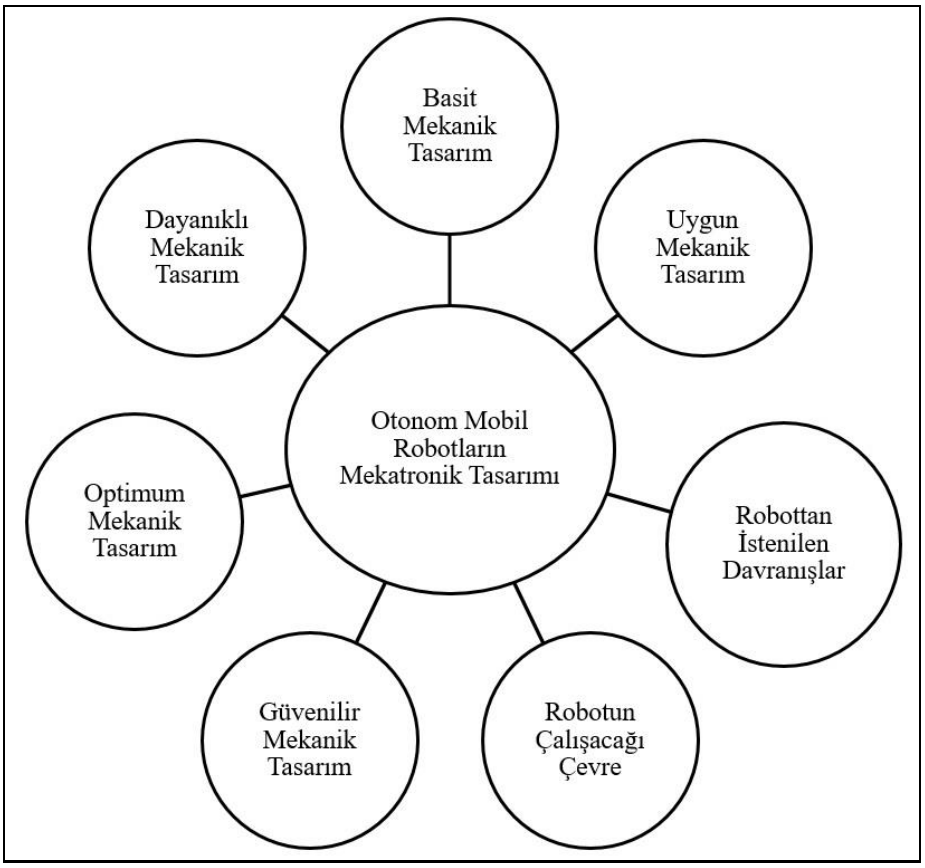
Şekil 2.5: "INVIA" Firmasının Geliştirdiği Mobil Depo Robotunun Genel Mekanik Tasarım Bölümleri [16]

Şekil 2.5'de "INVIA" firmasının geliştirdiği mobil depo robotunun mekanik alt sistemleri görülmektedir. 220 numaralı bölge motor tahrik sisteminin bulunduğu

taban bölgesini, 230 uzayabilir asansör bölgesini, 240 numaralı bölge parça alıcı bölgeyi göstermektedir. 230 numaralı uzayabilir asansör bölgesi 220 numaralı motor tahrikli taban bölgesine bağlıdır. 230 numaralı asansör bölgesi 240 numaralı parça alıcı bölgeyi istenilen yüksekliklere çıkartabilmek için uzayıp kısalabilir.

3. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTUNUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

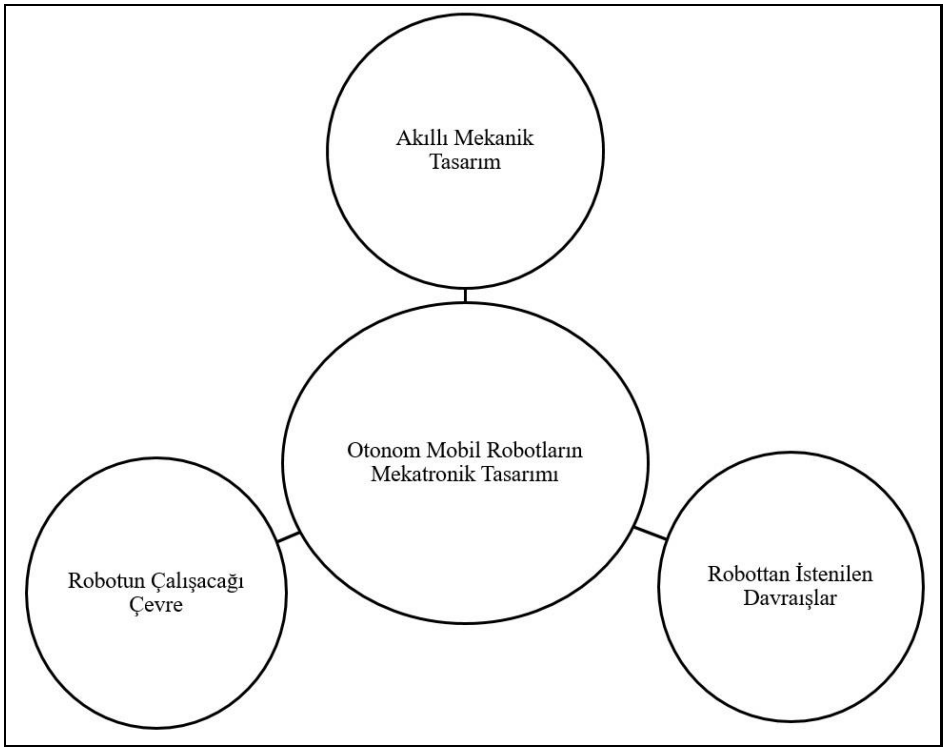
Mobil depo robotunun mekanik tasarım aşamasındaki en temel ve önemli sorularından bir tanesi, belirlenmiş bir ortamda istenilen davranışların en ideal mekanizmalarla nasıl gerçekleştirebileceği sorusudur. Bu temel soruyu derinlemesine düşünerek ideal tasarıma Şekil 3.1'deki parametreleri göz önüne alarak ulaşabiliriz. Optimum, basit, uygun, güvenilir tasarım parametrelerini göz önüne alarak akıllı mekanik tasarımlar gerçekleştirebiliriz.



Şekil 3.1: Otonom Mobil Robotun Mekanik Tasarım Aşamaları

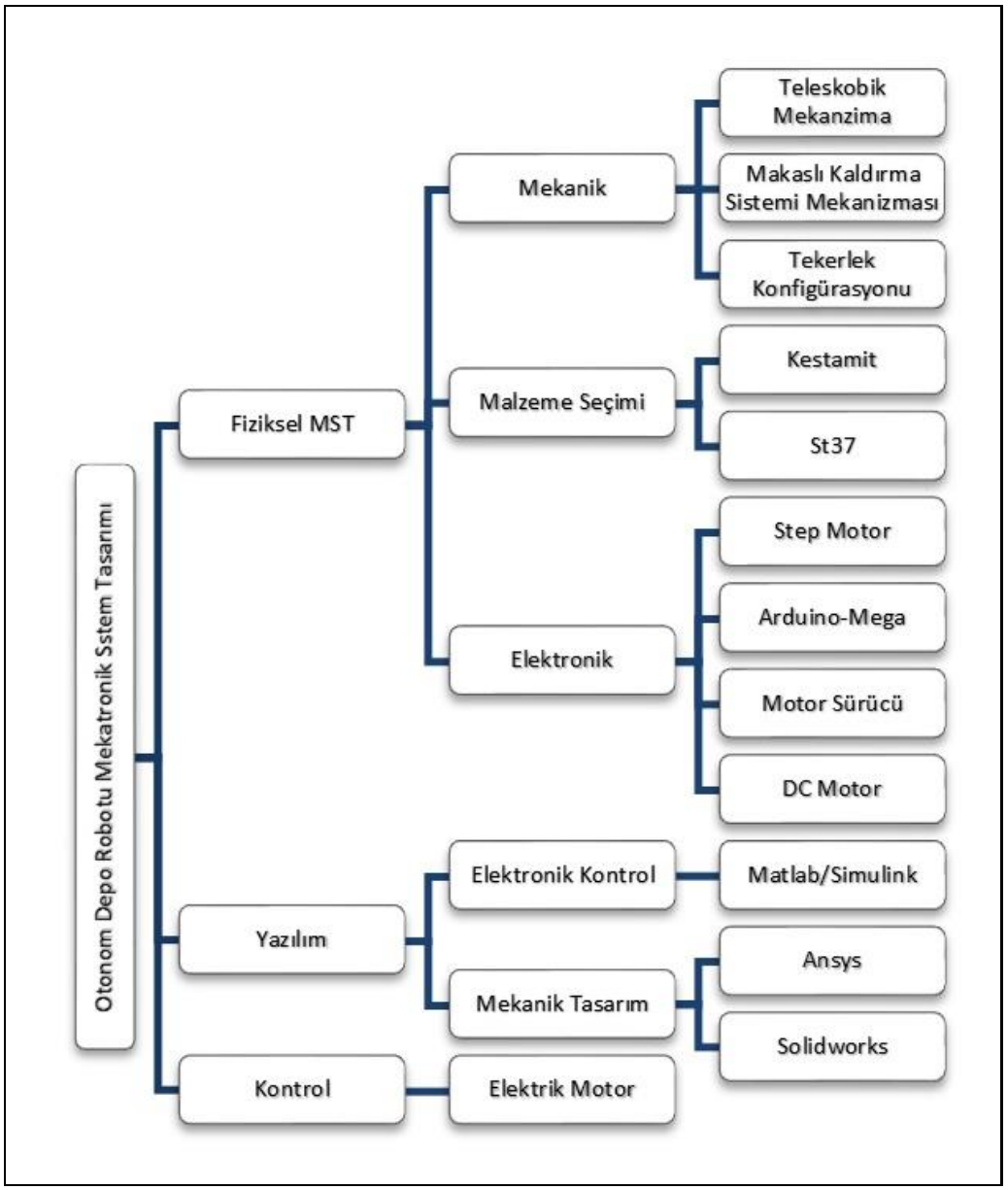
Mekanik tasarımın karmaşıklık derecesinin, robottan istenilen davranışların karmaşıklık derecesi ile yakın seviyelerde olması gereklidir. Dolayısıyla robot mekaniği sistemin bir parçası olacak şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 3.1'de görülen mekanik tasarım parametrelerini akıllı tasarım başlığı altında toplarsak Şekil 3.2'de görülen şemayı elde etmiş oluruz. Şekil 3.2'de görüldüğü üzere otonom mobil

robotların mekatronik tasarım aşamaları 3 bileşenden oluşur. Birincisi robotun içerisinde çalışacağı çevreyi tanımlayan çevresel faktörler, ikincisi istenilen görev ve fonksiyonların tanımı, üçüncüsü robotun mekanik tasarımıdır.



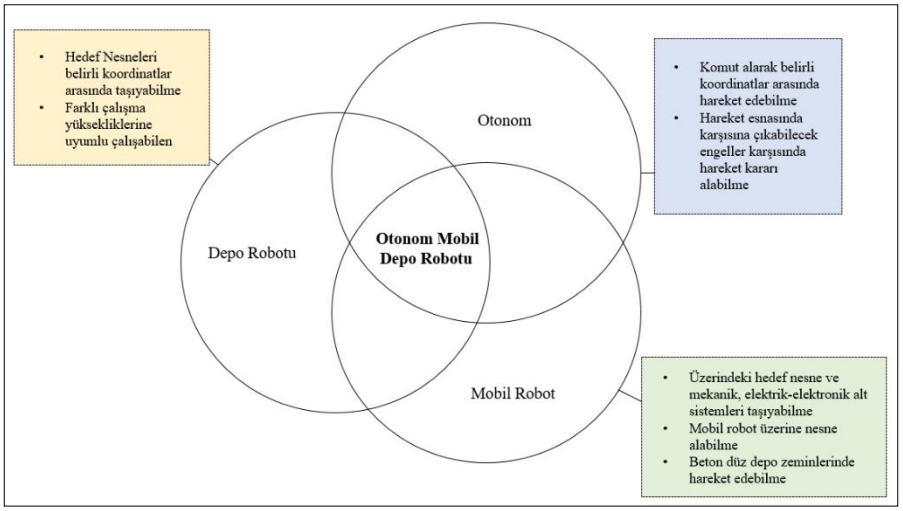
Şekil 3.2: Otonom Mobil Depo Robotunun Mekatronik Tasarım Aşamaları

Mekanik tasarım, ilk olarak robottan istenilen davranışlar ve çevresel koşullar göz önüne alındığında robotun mekanik parçalarını nasıl tasarlamalıyız sorusu ile başlamalıdır veya tasarlanmak istenen robot belirli bir mekanik mimariye sahip ise istenen görev için nasıl bir mekanizma veya mekanik parça tasarlayabiliriz sorusu ile de başlanabilir. Sonraki aşamada tasarım; kendi kendine kontrol edilebilirlik (dış hareket sağlayıcı kuvvetlerden bağımsız iç elektronik donanımı ile kontrol edilebilir anlamındadır) gerçeklenebilirlik (mevcut imalat yöntemleri ve ticari malzemeler kullanılarak üretilebilirlik anlamına gelir maliyet boyut ağırlık kriterleri bu parametre içerisinde ele alınabilir), güvenilirlik (bir tasarımın güvenilirliği istenilen ömür kriterlerini sağlayıp sağlayamaması ile ölçülür, belirli görevleri gerçekleştirmek için kullanılan eyleyici ve sensör sayıları da sistem güvenilirliğini saptamak için kullanılabilecek önemli parametrelerdir) parametrelerini sağlamalıdır [17].



Şekil 3.3: Otonom Mobil Depo Robotunun Mekatronik Sistem Tasarımı (MST)

Şekil 3.3'de görüldüğü üzere otonom mobil depo robotunun mekatronik sistem tasarımı (MST) gerçekleştirilmiştir. Mobil depo robotu için istenilen hareket fonksiyonları; belirlenen noktalar arasında hareket edebilmek, engeller karşısında rota tayini yapabilmek, kargo kutularının konulduğu raf yüksekliğine çıkabilmek, kargo kutusunu üzerine alabilmek olarak belirlenmiştir. Çalışma ortamı ve çevresel kısıtlar, düz zemin ve kapalı ortam koşulları olarak belirlenmiştir. Otonomi seviyesi; insan kontrolü olmadan iki nokta arasında hareket edebilmek, insan kontrolü olmadan iki hedeften birine ulaştığında üzerindeki mekanizmalar ile iki eksende hareket ederek kargo kutusunu üzerine alabilmek olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4: Tasarım Gerekleri Ana Katmanları ve Alt Katmanları

Şekil 3.4'de "Depo Robotu", "Mobil Robot", "Otonom" adı altında temel işlevsel katmanlar oluşturulmuştur. Yanlarında bu işlevleri yerine getirmeleri için gerekli yöntemler ve mekanizma çeşitlerini içeren alt katmanlar belirtilmiştir.



Şekil 3.5: Tasarım Gerekleri Alt Katmanları ve İlişkili Katmanların

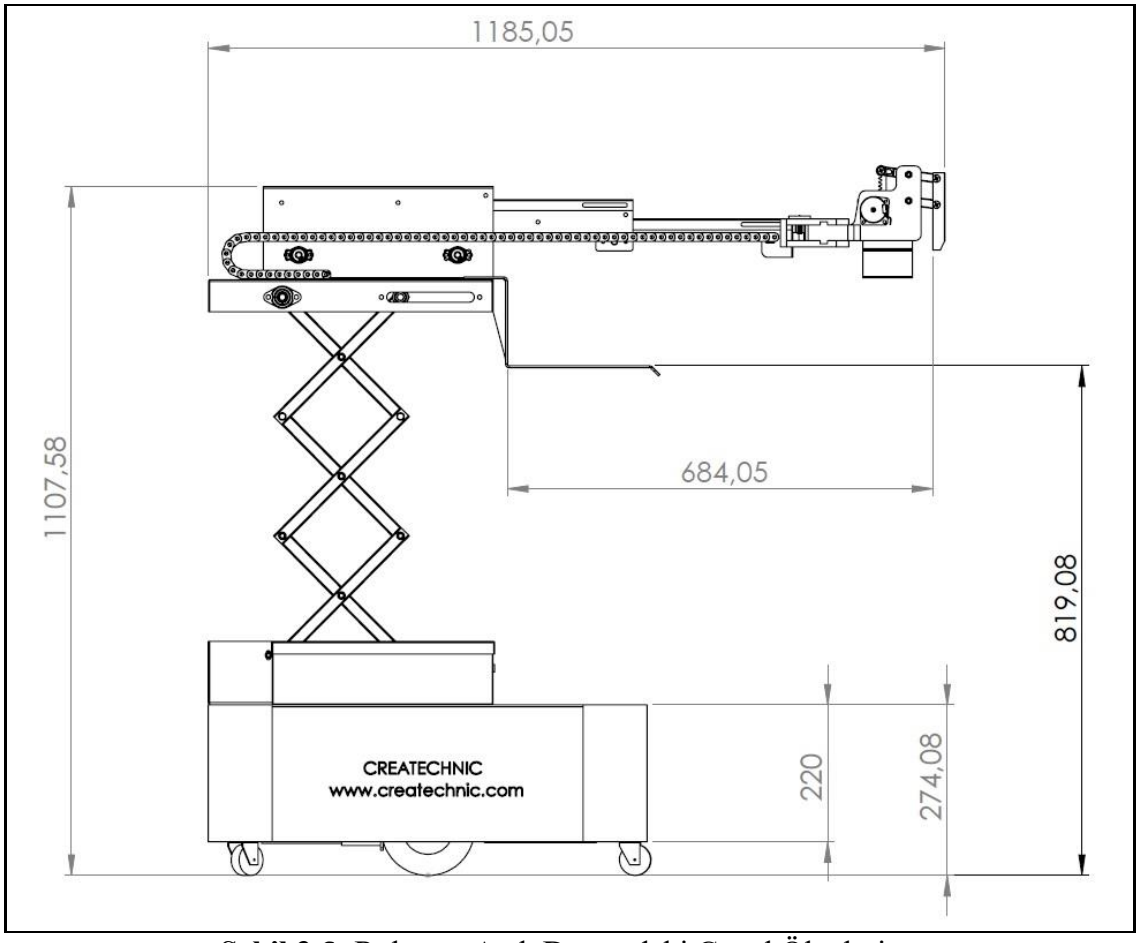
Şekil 3.5'de alt katmanlardaki yöntemleri gerçekleştirebileceğimiz fiziksel gereklilikler gösterilmiştir. Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki katman ve alt katman gerekliliklerine göre alt sistem tasarımları gerçekleştirilmiştir.

3.1 Mekanik Alt Sistem Tasarımı

3.1.1 Mobil depo robotu kavramsal tasarımı

Mobil robotunun çalışma ortam ölçüleri ve maliyet kısıtları göz önüne alınarak genel ölçülendirmeler yapılmıştır. Robotun çalışma ortamında maksimum kaplayacağı yer

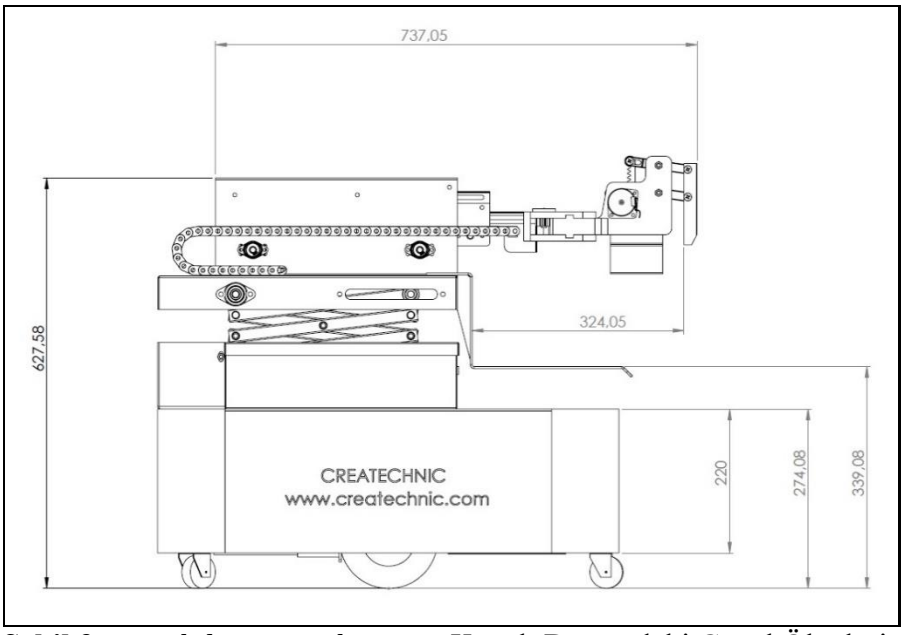
göz önüne alındığı zaman genel mekanik ölçüleri; maksimum robot uzunluğu 1185,05 mm, mekanik makaslar açık durumda iken maksimum robot yüksekliği 1107,58 mm, kaldırma ve hedef nesneyi üstüne alma işlemi yapan mekanizmaları içine alan şasi genişliği 636 mm olacak şekilde belirlenmiştir.



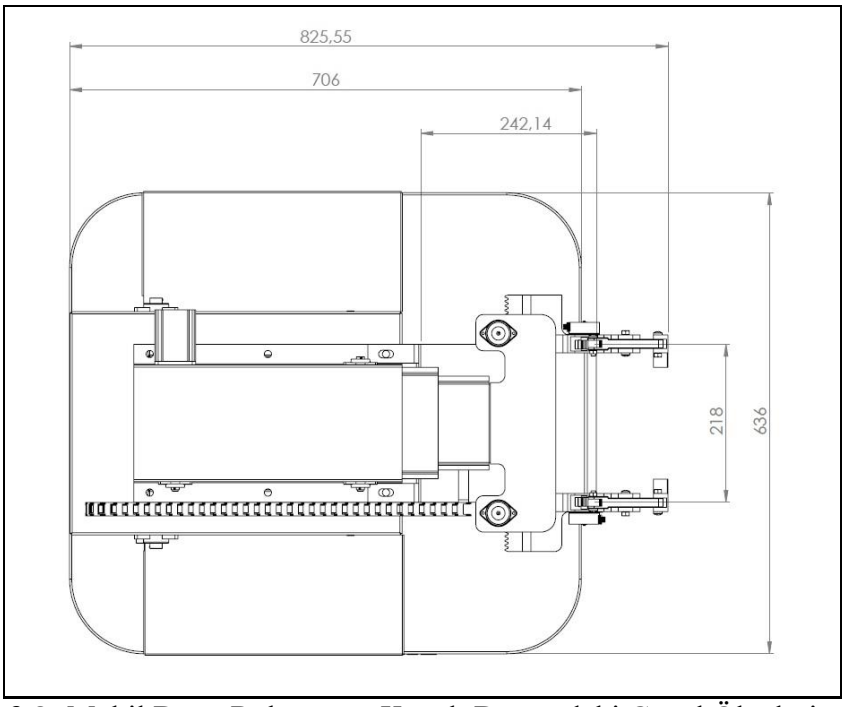
Şekil 3.6: Robotun Açık Durumdaki Genel Ölçüleri

Şekil 3.6'da robotun bütün uzuvlarının açık halde olduğu konumdaki mekanik ölçülendirmeleri gösterilmektedir. Önceki bölümlerde bahsedilen sistem gereksinimlerini sağlayan mekanik platformlar adım adım açıklanacaktır.

Robotun kapalı haldeki ölçüleri üzerine alacağı kutu boyutları, ağırlık kısıtlarına göre belirlenmiştir. Şekil 3.7 ve şekil 3.8'de görüldüğü üzere robotun çalışma ortamında minimum yer kaplayacağı şekilde genel ölçüleri; mekanik kol kapalı durumda iken minimum robot uzunluğu 737,05 mm, mekanik makaslar kapalı durumda iken minimum robot yüksekliği 627,58 mm, yükselme ve üstüne alma görevlerini yerine getiren mekanizmaları içine alan mekanik şasi genişliği 636 mm olacak şekilde belirlenmiştir.

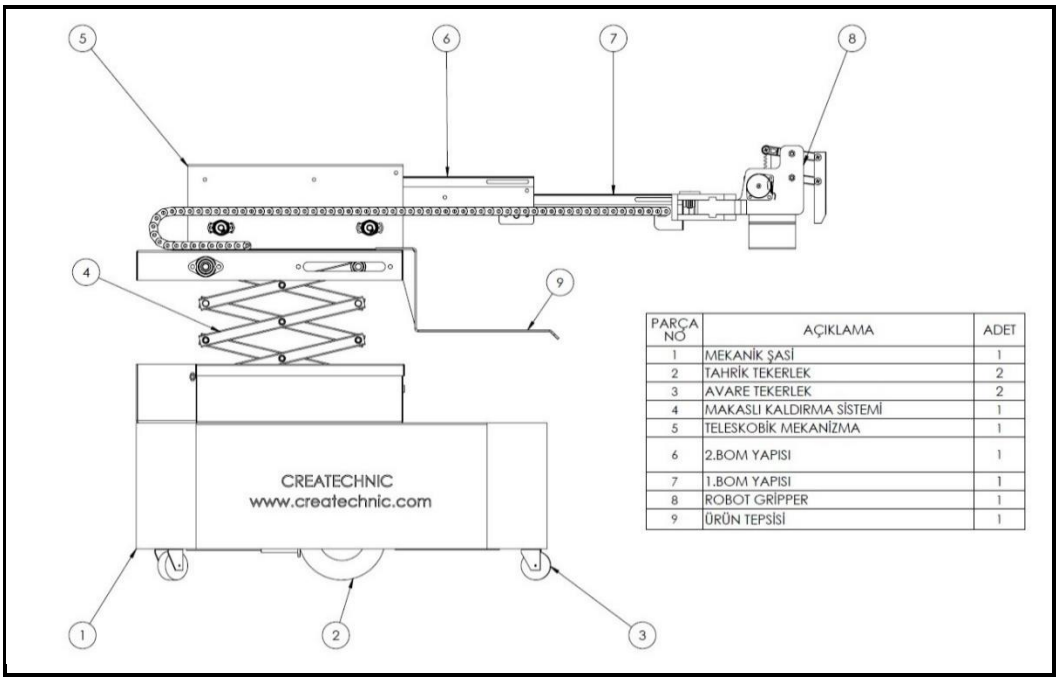


Şekil 3.7: Mobil Depo Robotunun Kapalı Durumdaki Genel Ölçüleri



Şekil 3.8: Mobil Depo Robotunun Kapalı Durumdaki Genel Ölçüleri

Mobil robotun ergonomik yapısı büyük önem taşır ve robotun performansı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Şekil 3.8'de görüldüğü üzere robotun ana şasisi kare geometriye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Kare olmasının sebebi özellikle dönüş hareketlerinde en az yer kaplayacak şekilde kendi ekseni etrafında dönebilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu dönüş hareketi şekil 3.10'da görüldüğü üzere sol ve sağ tekerlerin zıt yöne döndürülmesi ile gerçekleşir. Tekerler robotun geometrik merkezi üzerindeki eksen üzerinde yer alırlar ve birbirlerine göre simetriktirler.

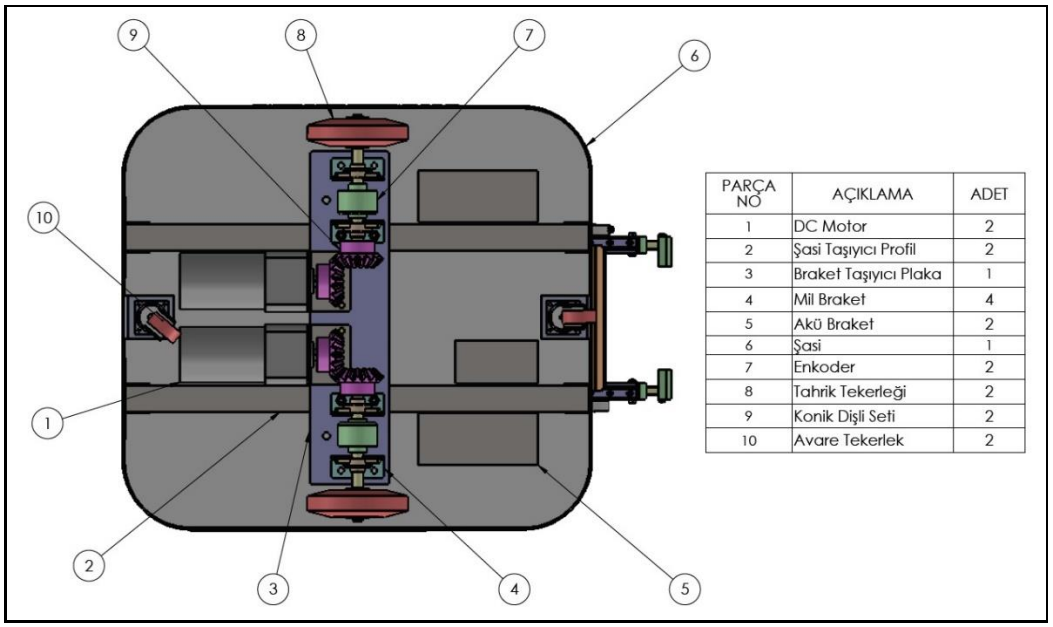


Şekil 3.9: Mobil Depo Robotunun Alt Komponentleri

Şekil 3.9'da mobil robotunun mekanik alt yapısını oluşturan alt komponentleri gösterilmiş. Mekanik şasi montaj tablosunda 1 numarası ile gösterilmiştir. Mekanik şasi üstünde montaj halinde bulunan makaslı kaldırma sistemi, ürün tepsisi, teleskobik mekanizma, robotik tutucu sistem, ürün ve kendi mekanik ağırlığını taşıyacak şekilde tasarlanmış olup montaj tablosunda 2 ile gösterilen iki adet bağımsız tahrik tekerleği ile robotun yol sürüş fonksiyonlarını gerçekleştirir. Montaj tablosunda 5, 6, 7, numaraları ile gösterilen teleskobik mekanizma taşınacak olan ürüne erişim için kullanılır ve nesneyi robot tepsisi üzerine alma ve geri bırakma işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılır. Montaj tablosunda 8 ile gösterilen robotik tutucu sistem ürünü kavramak için kullanılır. Mekanik platformu oluşturan alt sistem tasarımları adım adım açıklanacaktır.

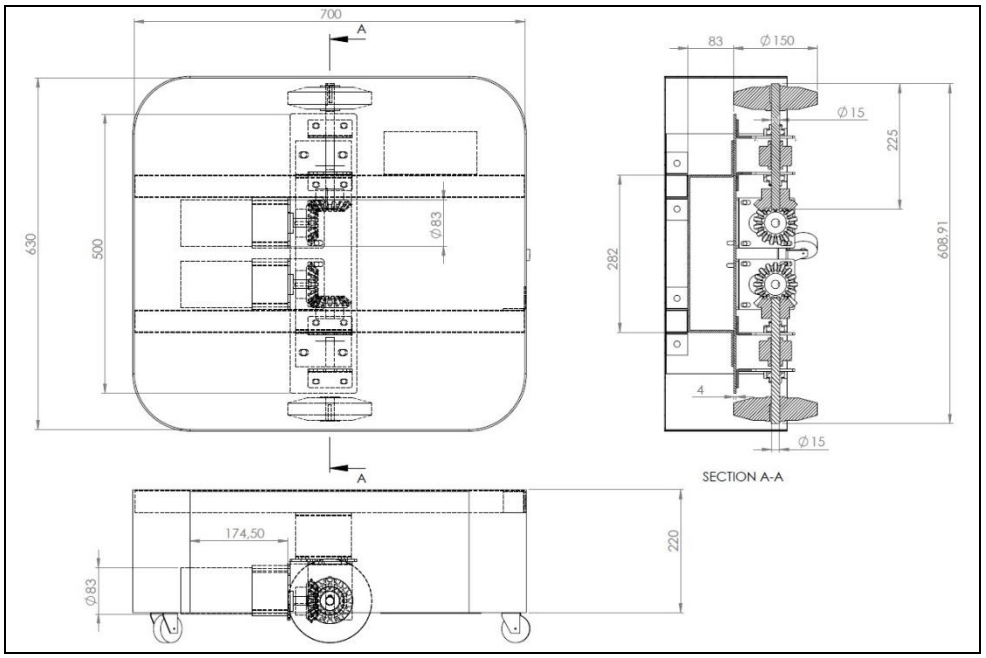
3.1.2 Mekanik şasi tasarımı

Mobil depo robotunun alt bölümünde bulunan mekanik şasi, üstündeki bütün ağırlığı taşıyabilen aynı zamanda robot geneline manevra ve hareket kabiliyeti kazandıran yapıdır. Şekil 3.10'da görüldüğü üzere mekanik şasi tekerlek, DC motor, düz konik dişliler, aküler ve enkoderlerden oluşur.



Şekil 3.10: Mekanik Şasi Alttan Görünüş

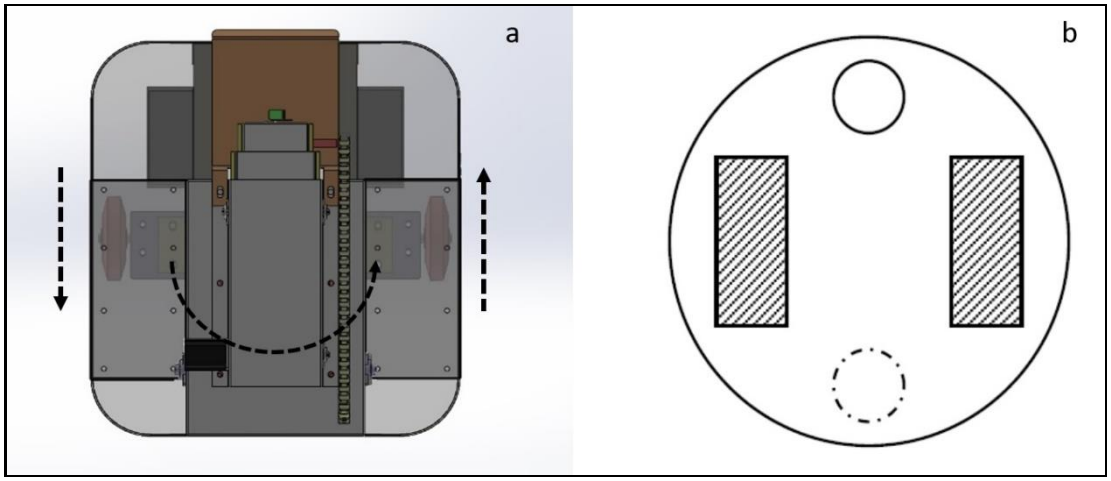
Şekil 3.10'da 8 ile gösterilen tahrik tekerlekleri poliamid malzemeden seçilmiştir. Poliamid üzeri poliüretan kaplı tekerler düşük gürültülü çalışırlar sürtünme katsayıları yüksek olduğu için yol tutuş kabiliyetleri yüksektir. 150×40 mm poliamid üzeri poliüretan kaplı iki adet tahrik tekeri kullanılmıştır. Montaj tablosunda 1 numarası ile gösterilen iki adet DC elektrik motoru ile iki adet tekerlek bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. DC elektrik motorları şasi düzlemine en az yer kaplayacak şekilde paralel olarak yerleştirilmiştir. Dokuz numara ile gösterilen düz konik dişli seti tahrik motorlarından gelen tahrik momentini 90 derece ileterek tekerlere vermek için kullanılmıştır. Tekerlek kama ile tekerlek miline bağlıdır yedi numara ile gösterilen enkoder tekerlek miline setiskur yardımı ile bağlanarak tekerlek mili ile beraber döner. Böylece tekerleğin attığı tur miktarı enkoderden okunarak robotun hız ve gittiği yol miktarları hesaplanır. Yataklı rulmanlar ile tekerlek milinin yataklanması sağlanır. Şekil 3.11'de montajı gerçekleştirilmiş olan mekanik şasinin montajlanmış teknik resmi görülmektedir. Kesit alanı alınmış görünüşte konik dişliler, tahrik mili, tekerler ve bağlantı braketleri görülmektedir.



Şekil 3.11: Mekanik Şasi Teknik Resim Kesit Görünüş

Tekerlek tipi ve tekerlek konfigürasyonu robot mekanik tasarımında çok önemli yere sahiptir. Robotun üç özelliğini etkiler bunlar manevra kabiliyeti, kontrol edilebilirlik ve dengedir [18]. Genel olarak statik kararlılık minimum üç tekerlek ile sağlanır ve robot ağırlık merkezinin bu üç tekerleğin oluşturduğu üçgenin içinde kalması gerekir. Diferansiyel tahrikli sistemleri her bir tekerlek için ayrı eyleyici kullanılarak iki tekerin bağımsız olarak sürülebildiği sistemlerdir. Robot hareket vektörü iki adet bağımsız teker hareketinin toplamı olduğu için bu tip mobil robot mekanizmalarına diferansiyel tahrikli tanımı yapılmıştır. Tahrik tekerlekleri genellikle robotun iki yanına yerleştirilir. Tahrik edilmeyen tekerlekler robotu dengede tutacak şekilde yerleştirilirler. Avare olarak da isimlendirilen tahrik edilmeyen tekerlerin konfigürasyonu iyi ayarlanmadığı zaman özellikle manevralarda istenmeyen robot hareketlerine sebebiyet verebilmektedir. Tahrik tekerleri zıt yönlere eşit miktarda döndürüldükleri zaman mobil robota yerinde dönüş hareketini gerçekleştirmesini sağlarlar. Yerinde dönüş hareketi robotun dönme ekseni üzerinde yaptığı manevrayı ifade eder. Bu tekerlek konfigürasyonun faydası basit bir şekilde sistem ihtiyaçlarını karşılamasıdır. Diferansiyel tahrik sistemi yalnızca iki adet motora ihtiyaç duyar, çoğu zaman tekerler motora bir redüktör ile bağlanırlar. Basit olmasının yanında özellikle düz bir çizgide hareket etmesini sağlamak için gerekli kontrol yöntemleri oldukça zordur. Tahrik tekerleri aynı hızda hareket etmedikleri takdirde robot daha az hızda hareket eden tekerlek ekseni doğrultusunda hareket edecektir. Tahrik motorlarının aynı hızda dönmesini sağlamak yol pürüzlülüğü, güç aktarma

organlarındaki sürtünme farkları gibi sebeplerden ötürü zordur. Bu gibi mekanik hataları minimize etmek için doğru bilgiye sahip olmak önemlidir. Bu sistemde iki adet bağımsız tekere yerleştirilen quadrature enkoder yardımı ile dört defa sayma yöntemi uygulanarak tekerlek konumları ile ilgili bilgi elde edilmektedir. Şekil 3.12'de diferansiyel tipli sürüş için gerekli tekerlek konfigürasyonu görülmektedir. Robot tekerlek yapısı diferansiyel tip tekerlek konfigürasyonu kullanılarak sağlanmıştır.



Şekil 3.12: Robotun Saat Yönü Tersine Dönme Hareketi, Diferansiyel Sürüş Tekerlek konfigürasyonu

3.1.3 Tekerlek tahrik sistemi tasarımı

Diferansiyel tipli mobil araçların tahrik tekerlek motorlarını seçerken maksimum tork miktarı belirlenmelidir. Robotu ilerletmek için gerekli olan tork miktarı mobil robotun toplam çekiş kuvvet gereksinimleri üzerinden tanımlanabilir. Toplam çekiş kuvveti $F_{TÇK}$, yuvarlanma direncini yenmek için gereken kuvveti F_{YD}, tırmanma kuvveti F_{TK} ve ivmelenme için gerekli kuvvetlerin $F_{İK}$ toplamı olarak denklem 3.1'deki gibi ifade edilebilir;

$$F_{TÇK} = F_{YD} + F_{TK} + F_{İK} \quad \textbf{(3.1)}$$

Yuvarlanma direnci kuvveti F_{YD} araç ile sürüşü gerçekleştireceği yüzey arasındaki sürtünme kuvvetini yenecek şekilde sürüşü gerçekleştirebilmesi için gerekli kuvveti tanımlar. Araç ağırlığı "m" yerçekimi ivmesi "g" ve zemin ile tekerlek arasındaki sürtünme kuvveti "μ" parametrelerine bağlıdır denklem 3.2'deki gibi ifade edilir;

$$F_{YD} = m \times g \times \mu \quad \textbf{(3.2)}$$

$$F_{YD} = 80 \times 9{,}81 \times 0{,}012$$

$$F_{YD} = 9{,}41 \text{ [N]}$$

Tırmanma kuvveti F_{TK} aracı eğimli zeminde sürmek için gerekli kuvveti ifade eder denklem 3.3'deki gibi ifade edilir;

$$F_{TK} = m \times g \times \sin \emptyset \quad \textbf{(3.3)}$$

$$F_{TK} = 80 \times 9{,}81 \times \sin 0$$

$$F_{TK} = 0 \text{ [N]}$$

İvmelenme kuvveti $F_{İK}$ aracın sıfır hızlı durumdaki ataletini yenerek istenilen hıza ulaşmasını sağlayan kuvveti ifade eder denklem 3.4'deki gibi ifade edilir;

$$F_{İK} = \frac{m \times V_{mak}}{t} \quad \textbf{(3.4)}$$

$$F_{İK} = \frac{80 \times 0{,}5}{3}$$

$$F_{İK} = 16 \text{ [N]}$$

Toplam çekiş kuvveti $F_{TÇK} = 25{,}41$ N olarak bulunmuştur, (r_t) tekerlek yarıçapı olmak üzere gerekli teker torku τ_t denklem 3.5'deki gibi hesaplanır;

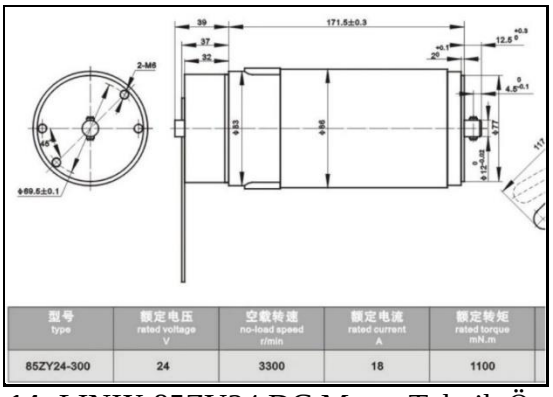
$$\tau_t = \frac{F_{TÇK} \times r_t}{2} \quad \textbf{(3.5)}$$

$$\tau_t = \frac{25{,}106 \times 75}{2}$$

$$\tau_t = 1102 \text{ [Nmm]}$$



Şekil 3.13: LINIX 85ZY24 DC Motoru



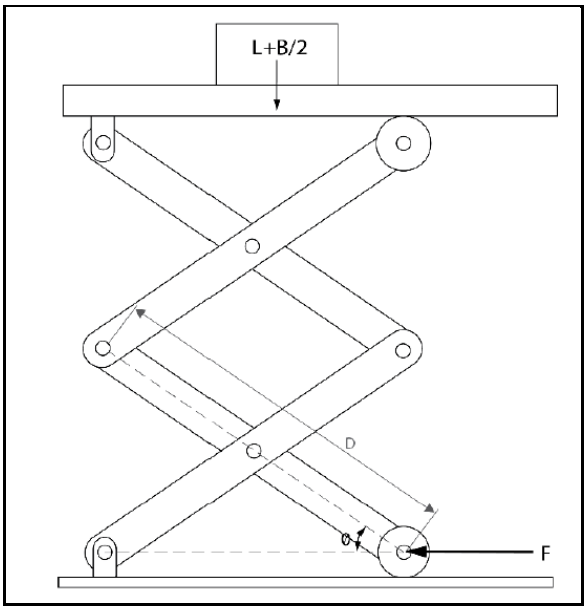
型号 type	额定电压 rated voltage V	空载转速 no-load speed r/min	额定电流 rated current A	额定转矩 rated torque mN.m
85ZY24-300	24	3300	18	1100

Şekil 3.14: LINIX 85ZY24 DC Motor Teknik Özellikleri

Sol ve sağ teker motoru aynı olmak üzere şekil 3.13'de görüldüğü üzere 1100 Nmm tork değerine sahip LINIX 85ZY24 DC motoru seçilmiştir. Şekil 3.14'de motorun mekanik ve fiziksel özellikleri görülmektedir.

3.1.4 Makaslı kaldırma sistemi tasarımı

Makaslı kaldırma mekanizmaları robot endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir kaldırma sistemi türüdür. Kaldırma yönündeki hareket; hidrolik, mekanik, pnömatik eyleyiciler vasıtası ile kaldırma yönüne dik olarak uygulanan kuvvet aracılığı ile gerçekleştirilir. Bu çalışmada, elektrik motorunda oluşturulan tork, vidalı mil ve vidalı mil rulmanı aracılığı ile x eksenli kuvvete dönüştürülüp, makaslar yardımı ile 90° iletilerek y eksenli kaldırma kuvveti oluşturulmuştur. Şekil 3.15'de makaslı kaldırma sistemine etkiyen kuvvetler gösterilmiştir.



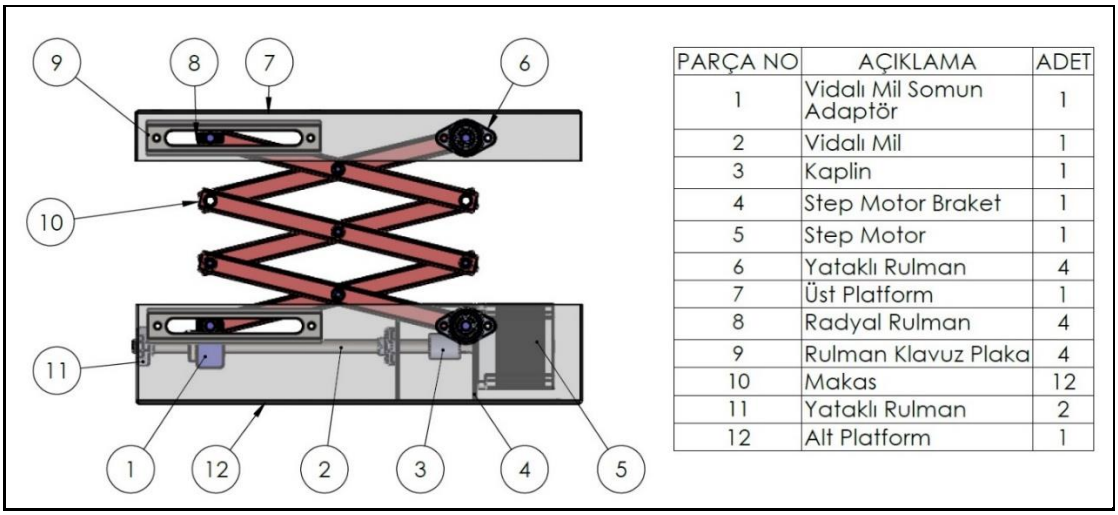
Şekil 3.15: Makaslı Kaldırma Sistemi Serbest Cisim Diyagramı [19]

Elektrik motoru ile oluşturulan F kuvveti statik olarak denklem 3.6'da görüldüğü gibi elde edilir [20].

$$F_{ak} = \left(L + \frac{B}{2}\right) \times \frac{n}{\tan \emptyset} \quad \textbf{(3.6)}$$

$$F_{ak} = \left(78{,}48 + \frac{196{,}2}{2}\right) \times \frac{2}{\tan(5{,}48°)}$$

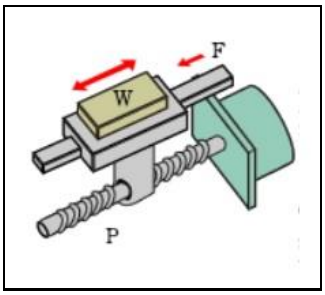
$$F_{ak} = 3681{,}874\ [N]$$



PARÇA NO	AÇIKLAMA	ADET
1	Vidalı Mil Somun Adaptör	1
2	Vidalı Mil	1
3	Kaplin	1
4	Step Motor Braket	1
5	Step Motor	1
6	Yataklı Rulman	4
7	Üst Platform	1
8	Radyal Rulman	4
9	Rulman Klavuz Plaka	4
10	Makas	12
11	Yataklı Rulman	2
12	Alt Platform	1

Şekil 3.16: Makaslı Kaldırma Sisteminin Alt Komponentleri

Şekil 3.16'da makaslı kaldırma mekanizmasını oluşturan alt komponentler gösterilmiştir. Montaj tablosunda 1 numarası ile gösterilen vidalı mil somunu ile beraber hareket eden vidalı mil somun adaptör parçası x ekseninde hareket eder. 5 numaralı step motorun mili 3 numaralı kaplin ile vidalı mil parçasına bağlanır. 4 numaralı step motor braketi, step motoru rijit bir şekilde 12 numaralı alt platforma bağlamak için kullanılır. 11 numaralı yataklı rulmandan 1 adet alt platform 1 adet braket üzerinde olacak şekilde 2 adet kullanılarak vidalı milin yataklanması sağlanır. Eğer vidalı mil zemine paralel bir şekilde y ekseninde hareket etmez ise 7 numaralı platform yere açılı olarak hareketini tamamlar bu istenen bir özellik değildir. Vidalı mil somununun x eksenindeki hareketi vidalı mil somun adaptör parçasına bağlı olan makas yapılarını y ekseninde harekete zorlar böylece x eksenindeki hareket y eksenine iletilmiş olur. 9 numaralı kılavuz plaka içinde hareket eden 8 numaralı radyal rulmanın hareketini x ekseninde sınırlandırarak üst platformun zemine olması gereken paralelliğini korumasını sağlar.



Şekil 3.17: Vidalı Mile Etkiyen Kuvvetler

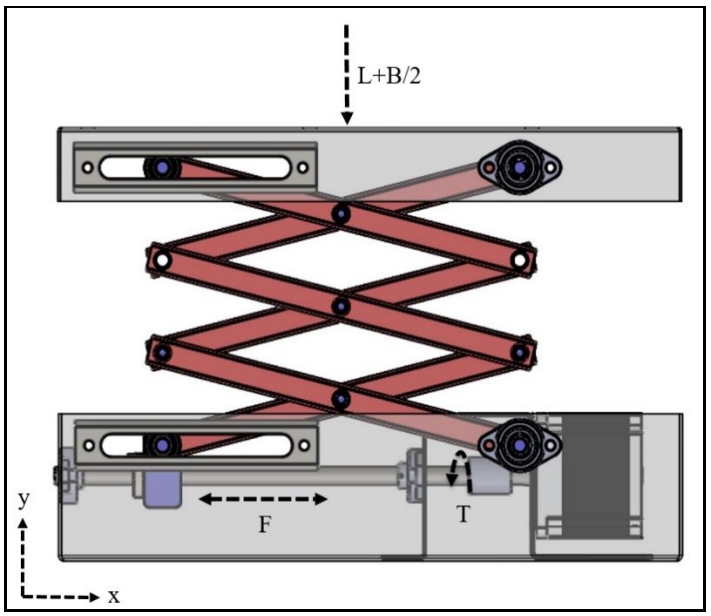
Şekil 3.17'de vidalı mil, vidalı mil somunu üzerinde taşınacak yük (W), uygulanması gereken kuvvet (F) ve vidalı mil adımı (P) gösterilmiştir.

$$T = \frac{1}{2\pi} \times P \times (F_{ak} + \mu \times W \times g) \qquad \textbf{(3.7)}$$

$$T = \frac{1}{2\pi} \times 0{,}005 \times (3681{,}87 + 0{,}2 \times 274{,}68 \times 9{,}81)$$

$$T = 3{,}36\ [\mathrm{Nm}]$$

Denklem 3.7'de (T) motor tarafından uygulanması gereken torku, (F) harici kuvvetleri, (W) yüklenen ağırlığı, (μ) kayma yüzeyleri üzerinde oluşan sürtünme katsayısını göstermektedir.

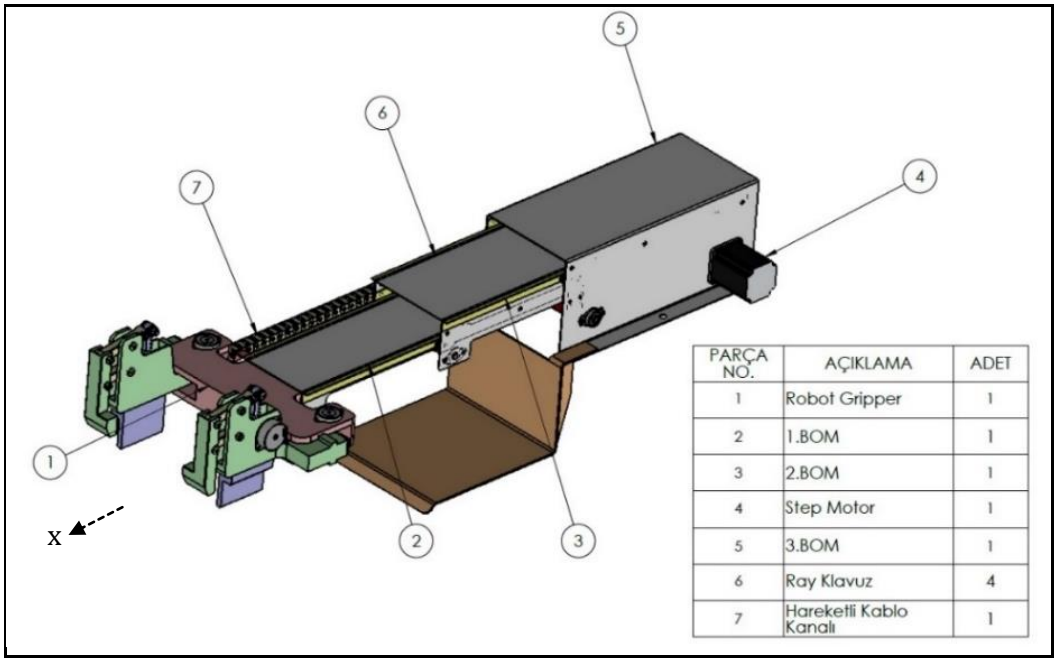


Şekil 3.18: Tasarlanan Makaslı Kaldırma Sistemine Etkiyen Kuvvetler

Şekil 3.18'de makaslı kaldırma mekanizmasına etkiyen kuvvetler gösterilmiştir. Kaldırılacak yük (L) ile belirtilmiştir, motor ve vidalı mil rulmanı vasıtasıyla oluşturulan eksenel itme kuvveti (F) olarak belirtilmiştir. Kaldırma sistemini içine alan hacimde bulunan komponentlerin toplam ağırlığı B ile ifade edilmiştir.

3.1.5 Teleskobik mekanizma sistemi tasarımı

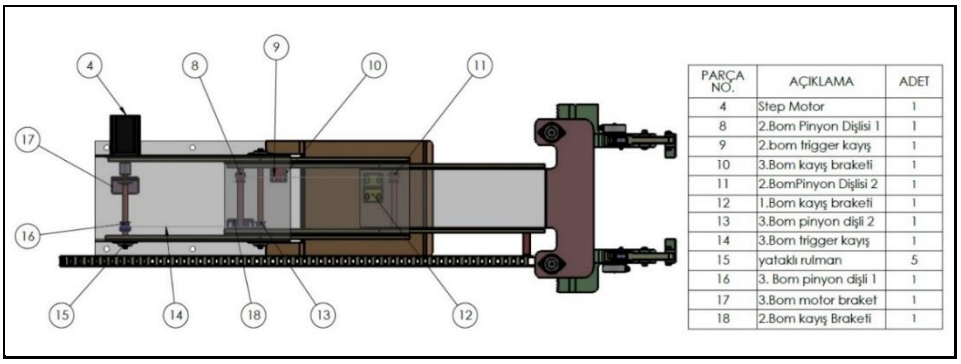
Teleskobik mekanizma üç adet bom yapısından oluşmaktadır. Üç adet bom yapısı birbiri üzerinde tekerlekli yataklar yardımı ile hareket etmektedir. Bir adet step motor miline bağlı pinyon dişlisinin ürettiği tahrik kuvveti triger kayışı yardımıyla birinci bom yapısında x eksenli kuvvet oluşturur bu hareket diğer bom yapılarına iletilir.



PARÇA NO.	AÇIKLAMA	ADET
1	Robot Gripper	1
2	1.BOM	1
3	2.BOM	1
4	Step Motor	1
5	3.BOM	1
6	Ray Klavuz	4
7	Hareketli Kablo Kanalı	1

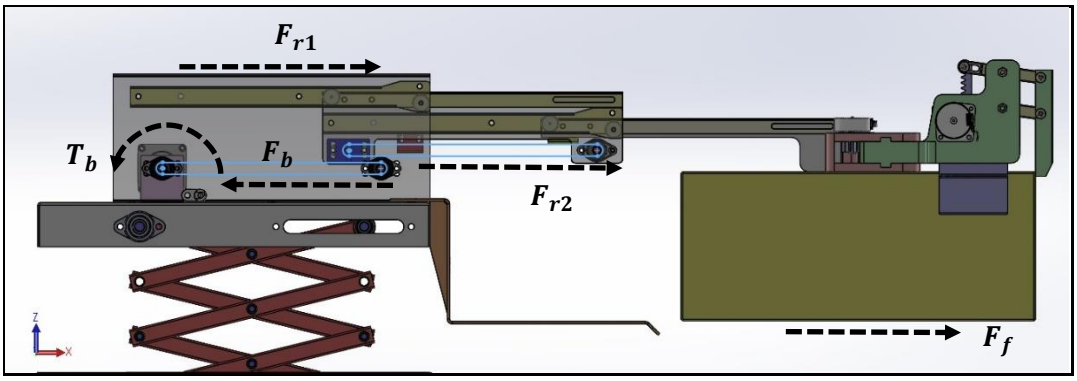
Şekil 3.19: Teleskobik Mekanizma Sisteminin Alt Komponentleri-1

Şekil 3.19'da teleskobik mekanizmayı oluşturan alt komponentler görülmektedir. Şekil 3.20'de görüldüğü üzere montaj tablosundaki 4 numaralı motor ile tahrik edilen üçüncü bom yapısı pinyon dişlisi ve trigger kayışı ile hareketi ikinci bom yapısına iletir. İkinci bom yapısında oluşturulan hareket pinyon dişlisi ve trigger kayışı ile birinci bom yapısına hareketi iletir. Birinci bom yapısı üzerine montajlanan robotik tutucu sistem yardımıyla hedef nesne kavranarak teleskobik mekanizmanın –x yönünde hareketi sağlanarak nesnenin robot tepsisine alınması sağlanır. Robot istenilen koordinatlara geldiğinde, teleskobik mekanizma +x yönünde hareket sağlayarak nesneyi ilgili koordinata bırakır.



PARÇA NO.	AÇIKLAMA	ADET
4	Step Motor	1
8	2.Bom Pinyon Dişlisi 1	1
9	2.bom trigger kayış	1
10	3.Bom kayış brakeli	1
11	2.BomPinyon Dişlisi 2	1
12	1.Bom kayış brakeli	1
13	3.Bom pinyon dişli 2	1
14	3.Bom trigger kayış	1
15	yataklı rulman	5
16	3. Bom pinyon dişli 1	1
17	3.Bom motor braket	1
18	2.Bom kayış Brakeli	1

Şekil 3.20: Teleskobik Mekanizma Sisteminin Alt Komponentleri-2



Şekil 3.21: Teleskobik Mekanizmaya Etkiyen Kuvvetler

Ana tahrik motoru tarafından oluşturulan dönme momenti, triger kayışı ile pinyon dişlisine iletilir. Böylece pinyon dişlisi yuvarlanma dairesi çapına teğet olacak şekilde x yönlü kuvvet oluşur. Teleskobik raylar üzerinde –x yönünde yuvarlanma kayma dirençleri oluşur. X yönünde yer değişimi yaptırılmak istenen nesne ve alınmak istendiği yüzey arasında –x yönlü sürtünme kuvveti oluşur. Seçilecek teleskobik mekanizma tahrik motoru için gerekli tork değeri bu kuvvetler dikkate alınarak hesaplanır. Şekil 3.21'de teleskobik mekanizma üzerinde oluşan kuvvetler gösterilmiştir.

$$F_b = F_{rol.1} + F_{rol.2} + F_f \quad \textbf{(3.8)}$$

$$F_{rol} = c \times W \quad \textbf{(3.8a)}$$

c: yuvarlanma direnç katsayısı (plastik / metal)

W: tekerlekler üzerindeki yük

F_{rol}: yuvarlanma direncini yenmek için gerekli kuvvet

$$F_{rol.1} = 0{,}3 \times 53{,}01 = 15{,}93 \text{ [N]}$$

$$F_{rol.2} = 0{,}3 \times 75{,}76 = 22{,}73 \text{ [N]}$$

$$F_f = \mu \times N \quad \textbf{(3.8b)}$$

$$N = m_{nesne} \times g$$

$$F_f = 0{,}5 \times 2 \times 9{,}81$$

$$F_f = 9{,}81\ [N]$$

$$F_b = 15{,}93 + 22{,}73 + 9{,}81 = 48{,}47\ [N]$$

$$T_b = F_b * r_p \quad \textbf{(3.5a)}$$

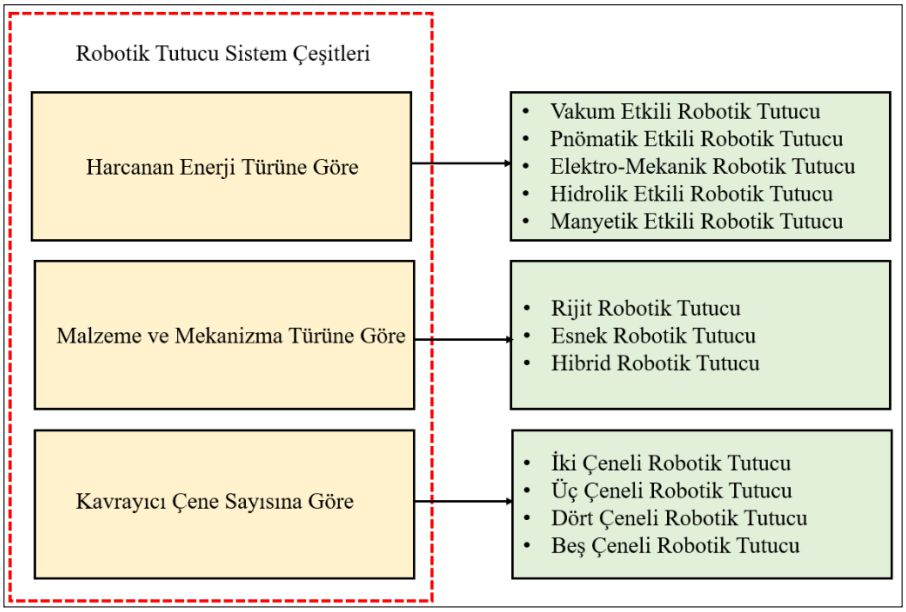
$$F_{bm} = \frac{2200}{6{,}35} = 346{,}45\ [N]$$

$$S = \frac{346{,}45}{48{,}47} = 7{,}14$$

Sistem güvenlik faktörü 7,14 olarak hesaplanmıştır.

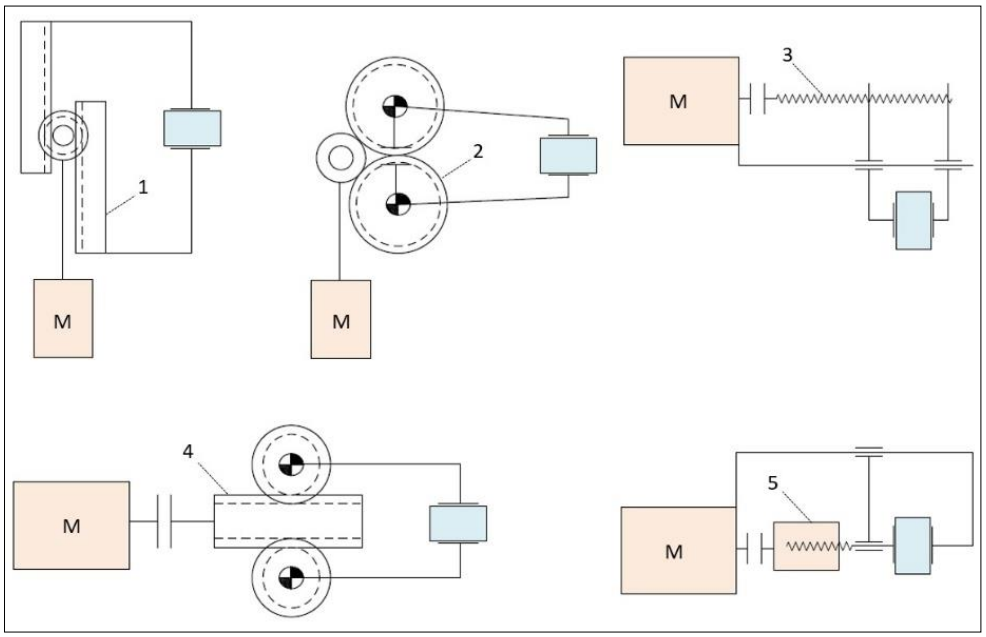
3.1.6 Paralel çeneli robotik tutucu sistem tasarımı

Robotik tutucular gerçekleştirilmesi istenen eylem için nesneleri kavrama ve serbest bırakma fonksiyonlarını yerine getiren uç eyleyicilerdir. Robotik tutucular endüstriyel robotların çevre ve nesne ile etkileşime geçmesini sağlama görevini yerine getirirler. Robotik tutucular bir veya birkaç nesneyi kavrayabilecek şekilde tasarlanabildiği gibi kavranmak istenen nesne için özel olarak Şekil 3.22'de görüldüğü üzere farklı sistemlere sahip olarak da geliştirilebilirler [21].



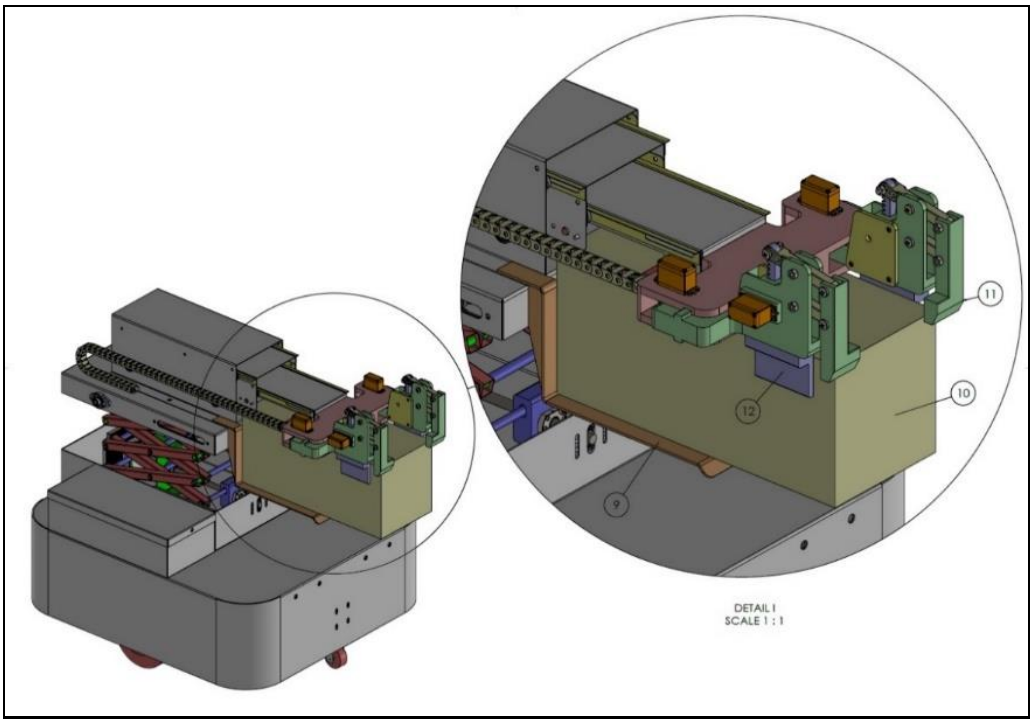
Şekil 3.22: Robotik Tutucu Sistem Çeşitleri

Şekil 3.23’de elektrik motoru kullanılarak oluşturulabilecek farklı mekanizma teknikleri görülmektedir. 1 numaralı sistemde kremayer pinyon dişli mekanizması kullanılarak, 2 numaralı sistemde düz dişli kullanılarak, 3 numaralı sistemde ters yönde açılmış vida mil kullanılarak, 4 numaralı sistemde sonsuz dişli ve karşılık dişlileri kullanılarak, 5 numaralı sistemde vidalı mil kullanılarak geliştirilmiş uygulama örnekleri görülmektedir [22].



Şekil 3.23: Elektrik Motorları İle Çalışan Tutucular İçin Temel Tasarım Stratejileri

Tasarımı gerçekleştirilecek olan robotik tutucu sistem depo rafları üzerinde bulanan düzgün geometrili nesneleri almak için tasarlanacaktır. Bunun için paralel çeneli robotik tutucu sistem uygulamasının daha verimli sonuçlar vereceği öngörülüp tasarım bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. Paralel çeneli robotik tutucu sistem, düzgün geometrili nesnelerin dış kenarlarını kavramak için tutulmak istenen parça üzerinde paralel olarak kapanır. Şekil 3.24’de tasarlanan mobil depo robotunun ürünü robot ürün tepsisi üstüne aldığı durumdaki hali gösterilmiştir.

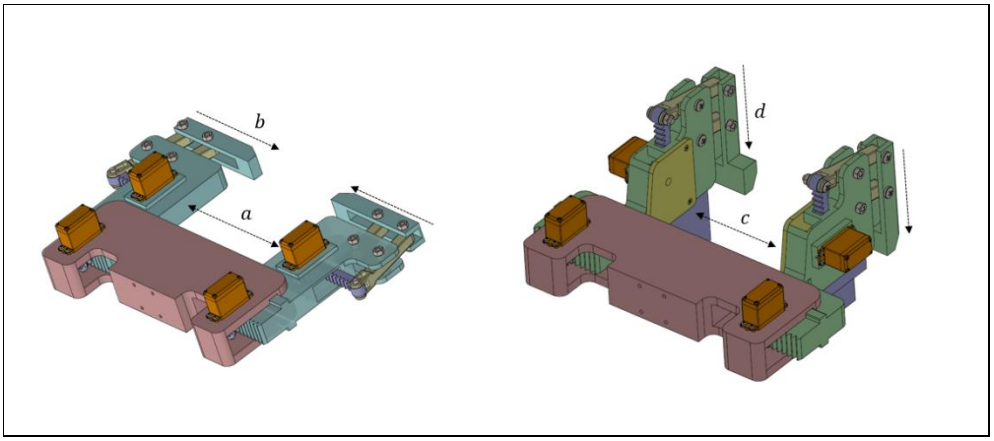


Şekil 3.24: Paralel Çeneli Robotik Tutucunun Hedef Nesneyi Kavrama Uygulaması (9. Ürün tepsisi, 12. Paralel çene, 10. Nesne, 11. Dikey ön çene)

Mobil depo robotu, kutu ölçüleri standardize edilmiş depolarda kullanılmak için tasarlanmıştır, tasarım kriterleri Çizelge 3.1'de görülmektedir.

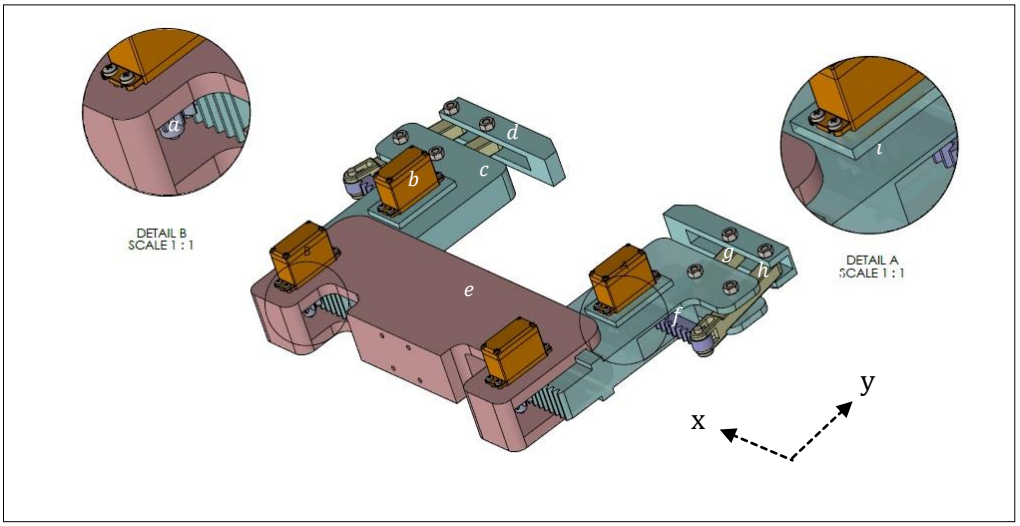
Çizelge 3.1: Mobil Depo Robotunun Tasarım Hedef Parametreleri

Tasarım Hedefleri	Değerler
Maksimum Taşıyabileceği Yük	1 kg
Maksimum Kutu Hacmi (En, Boy, Yükseklik)	$18\times25\times10$ cm^3
Taşınacak Nesne Materyali	Karton
Robotik Tutucu Sistem Ağırlığı	1 kg



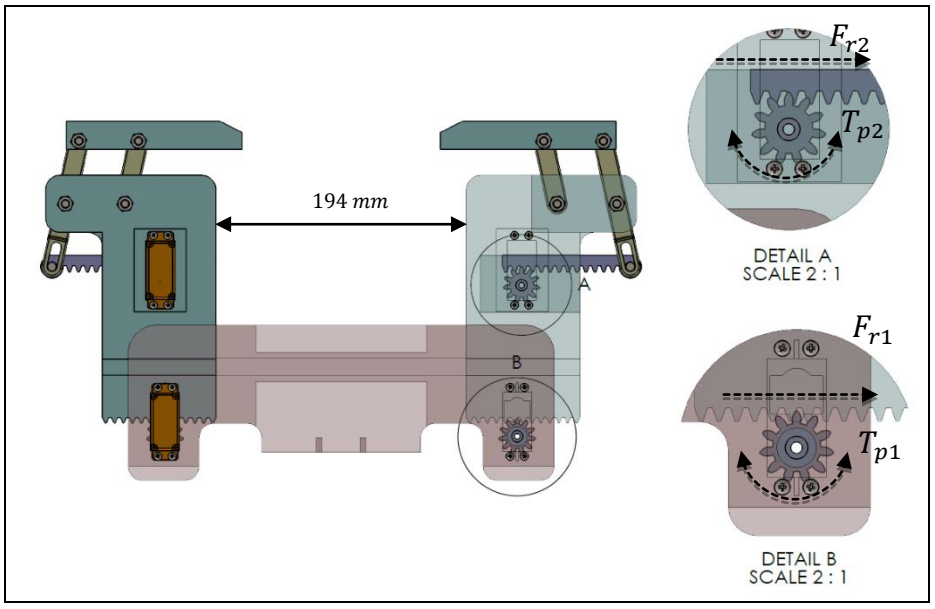
Şekil 3.25: Paralel Çeneli Robotik Tutucu Sistem Tasarımları

Şekil 3.25'de görüldüğü üzere iki adet paralel çeneli robotik tutucu sistem tasarımı yapılmıştır. Birinci tasarımda dört adet servo motor ile tahrik edilen kremayer dişli mekanizması kullanılmıştır. Robotik tutucu kavranması istenen kutuyu ilk gördüğü alnından yakalayıp, kutu yanal yüzeylerine baskı uygulayarak, teleskobik mekanizma aracılığıyla kutuyu robot tepsisi üzerine alma işlemini gerçekleştirir. Fakat şekil 3.28 ve şekil 3.29'da görüldüğü üzere kavrayabileceği nesne ölçüleri sınırlıdır, daha büyük geometrili nesneleri kavrayabilmesi için mevcut tasarımda çene tasarım ölçülerinin büyütülmesi gerekmektedir bu durum da 1 kg olarak belirlenen robotik tutucu sistem ağırlık değerlerinin üstüne çıkılmasına sebebiyet vermektedir. Bu durum kaynaklı ikinci paralel çeneli robotik tutucu tasarımı geliştirilmiştir.



Şekil 3.26: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Alt Komponentleri (a. Pinyon Dişli, b. Servo Motor, c. Çene-1, d. Çene-2, h. Uzuv-2, f. Kremayer Dişli Parça, g. Uzuv-1, h. Uzuv-2, ı. Çene-2 Pinyon Dişli)

Paralel çeneli robotik tutucu birinci tasarımı Şekil 3.27'de görüldüğü üzere iki adet çene-1 yapısı, iki adet çene-2 yapısı ve bir adet kılavuz parçasından oluşmaktadır. Çene-1 yapısı nesneyi x ekseninde sıkıştırıp kavramak için tasarlanmıştır. X eksenindeki hareket servo motor tahrikli pinyon dişli yardımı ile kılavuz parça üzerindeki kremayer dişli kısmın hareketi sonrası oluşur. Çene-2 yapısı x ekseninde hareket ederek nesneyi x ekseninde kavrandıktan sonra y eksenindeki hareketini çekme yönünde kısıtlar. Böylece y ekseninde teleskobik mekanizma tarafında çekilen nesne kaymadan kavranmış olur.



Şekil 3.27: Birinci Robotik Tutucu Tasarımı Uygulanan Kuvvetler

Şekil 3.27'de iki adet x ekseninde hareket eden kremayer pinyon dişli mekanizması görülmektedir. Yatay kremayer dişli uygulamalarında kütle hareketinden iki kuvvet sorumludur. Birinci kuvvet kılavuz parçasına etki eden statik sürtünme kuvveti, ikinci kuvvet ise kütleyi ivmelendirip hareket etmesini sağlayan kütle atalet kuvvetidir. Pinyon dişlisinin atalet momenti denklem 3.9'daki gibi hesaplanır, denklem 3.10'da hesaplanan açısal ivme değeri ile çarpılarak kütle atalet tork değeri elde edilmiş olur. Denklem 3.11'de sürtünme kuvveti kaynaklı tork değeri ve kütle atalet kuvveti kaynaklı tork değeri toplanarak motor seçimi için gerekli olan genel tork denklemi ifadesi elde edilmiş olur.

$$m_{ç1} = 0{,}467 \ \text{kg}$$

$$m_p = 0{,}0045 \ \text{kg}$$

$$r_p = 11{,}34 \ \text{mm}$$

$$J = \frac{1}{2} \times m_p \times {r_p}^2 \qquad \textbf{(3.9)}$$

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \qquad \textbf{(3.10)}$$

$$\Delta\omega = \omega_{final} - \omega_{başlangıç}$$

$$\Delta\omega = 5{,}23 \ \text{rad/sn}$$

$$T_p = (F_s \times r_p) + (J \times \alpha) \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$T_{p1} = (m_{ç1} \times g \times \mu \times r_p) + (\frac{1}{2} \times m_p \times {r_p}^2 \times \frac{\Delta\omega}{\Delta t})$$

$$T_{p1} = (0{,}467 \times 9{,}81 \times 0{,}4 \times 11{,}34) + (\frac{1}{2} \times 0{,}0045 \times 11{,}34^2 \times \frac{5{,}23}{1})$$

$$T_{p1} = 22{,}29 \text{ Nmm}$$

$$m_{ç2} = 61{,}96 \text{ gr}$$

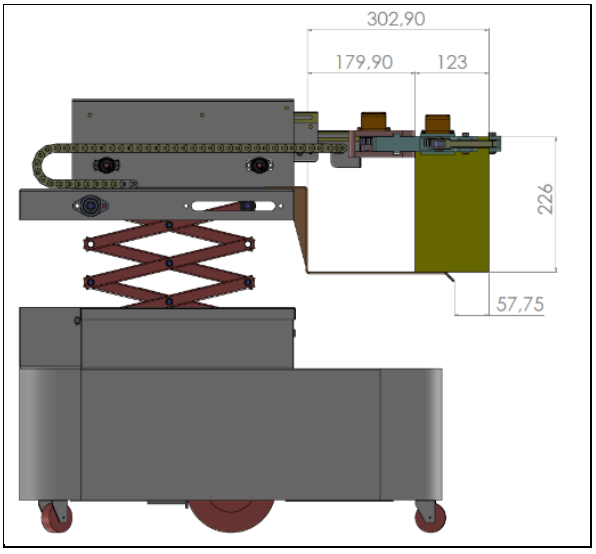
$$T_{p2} = (m_{ç2} \times g \times \mu \times r_p) + (\frac{1}{2} \times m_p \times {r_p}^2 \times \frac{\Delta\omega}{\Delta t})$$

$$T_{p2} = (0{,}062 \times 9{,}81 \times 0{,}4 \times 11{,}34) + (\frac{1}{2} \times 0{,}0045 \times 11{,}34^2 \times \frac{5{,}23}{1})$$

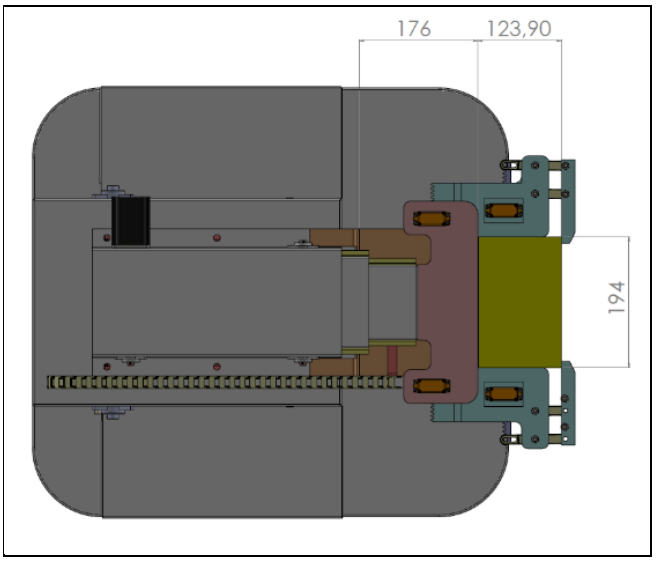
$$T_{p2} = 4{,}27 \text{ Nmm}$$

Çene-1 mekanik parçasının hareketi için gerekli motor tork değeri 22,29 Nmm'dir, çene-2 mekanik parçasının hareketi için gerekli motor tork değeri 4,27 Nmm olarak hesaplanmıştır.

Birinci tasarımın şekil 3.28 ve şekil 3.29'da görüldüğü üzere maksimum kavrayabileceği kutu ölçüleri 194 mm en, 123 mm boy, 226 mm yükseklik değerleridir.

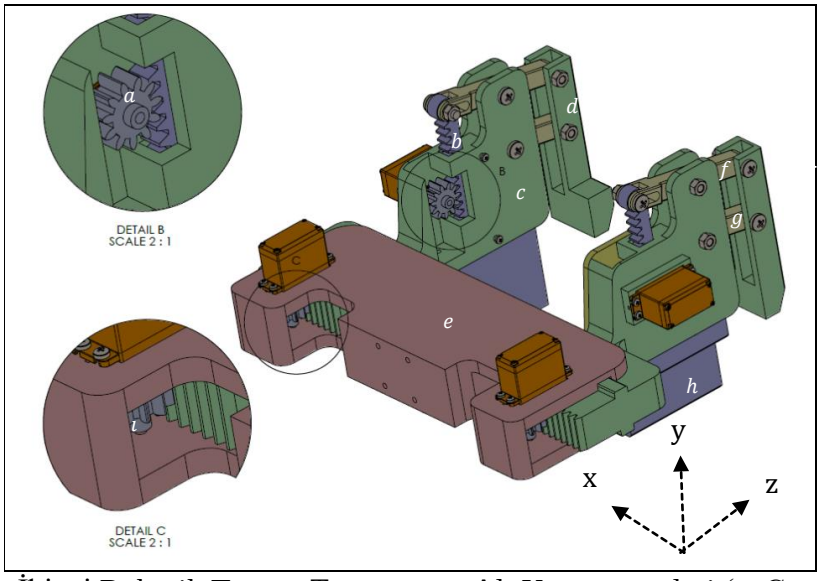


Şekil 3.28: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-1



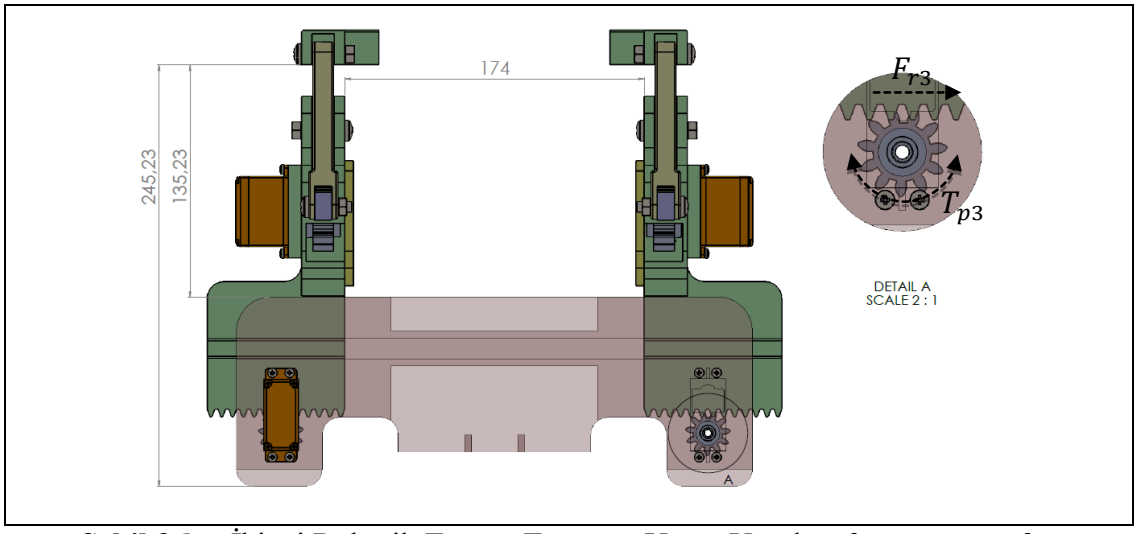
Şekil 3.29: Birinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-2

Robotik tutucu ikinci tasarımı hedef nesne ölçüleri olan 18×25×10 cm^3 hacmindeki nesneleri kavrayacak şekilde oluşturulmuştur. 4 adet servo motor ile tahrik edilen kremayer dişli sistemi kullanılmıştır. Robotik tutucu, kavranması istenen kutunun arka yüzeyinden yakalayıp, kutu yanal yüzeylerine baskı uygulayarak, teleskobik mekanizma vasıtasıyla nesneyi robot ürün tepsisi üzerine alma işlemini gerçekleştirir. Daha büyük geometrili nesnelerin kavranması sırasında, nesne yan yüzeylerini yakalayabilmesi için yatay kremayer dişli mekanizması, arka yüzeylerini yakalayabilmesi için de düşey kremayer dişli mekanizması geliştirilmiştir.



Şekil 3.30: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Alt Komponentleri (a. Çene-1 pinyon dişli, b. Kremayer Dişli, c. Çene-1, d. Çene-2, e. Kılavuz Parça, f. Uzuv-2, g. Uzuv-1, h. Paralel Çene)

Şekil 3.30'da görüldüğü üzere ikinci paralel çeneli robotik tutucu tasarımı iki adet çene-1 yapısı, 2 adet çene-2 yapısı ve bir adet kılavuz parçasından oluşmaktadır. Çene-1 yapısı nesneyi x ekseninde sıkıştırıp kavramak için tasarlanmıştır. X eksenindeki hareket servo motor tahrikli pinyon dişli yardımı ile oluşturulur. Çene-2 yapısı y ekseninde hareket ederek nesneyi kavradıktan sonra z eksenindeki hareketini çekme yönünde (z) kısıtlar. Böylece z ekseninde teleskobik mekanizma tarafından çekilen nesne kaymadan kavranmış olur.



Şekil 3.31: İkinci Robotik Tutucu Tasarımı Yatay Yönde Etkiyen Kuvvetler

Yatay kremayer dişli uygulamalarında kütle hareketinden iki kuvvet sorumludur. Şekil 3.31'de görüldüğü üzere birinci kuvvet kılavuz parçasına etki eden statik sürtünme kuvveti, ikinci kuvvet ise kütleyi ivmelendirip hareket etmesini sağlayan kütle atalet kuvvetidir. Denklem 3.11 uygulanarak gerekli tork değeri hesaplanacaktır.

$$m_{çene} = 0{,}526 \text{ kg}$$

$$T_{p3} = (0{,}526 \times 9{,}81 \times 0{,}4 \times 11{,}34) + (\frac{1}{2} \times 0{,}0045 \times 11{,}34^2 \times \frac{5{,}23}{1})$$

$$T_{p3} = 24{,}9 \text{ Nmm}$$

Tahrik motorları için 833,56 Nmm tork değerine sahip şekil 3.32'da teknik özellikleri görülen MG995 servo motoru seçilmiştir.

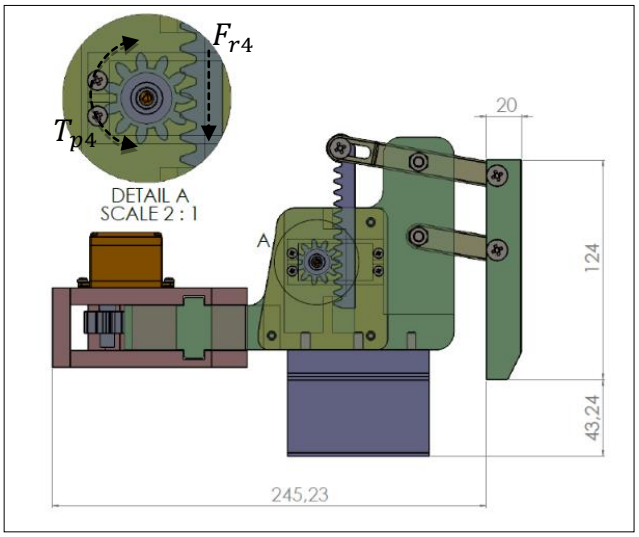
Teknik Özellikler

- Ağırlık : 55g
- Genel Ölçüleri : 40,7×19,7×42,9 mm
- Tork Değeri : 8,5 kfg.cm (4,8V)
- Çalışma Hızı : 0,2 s/60° (4,8 V)
- Çalışma Voltajı : 4,8 V , 7,2 V
- Çalışma Sıcaklık Aralığı : 0°C - 55°C



Şekil 3.32: M995 Servo Motor Teknik Özellikleri

Dikey kremayer dişli uygulamalarında yük y ekseninde uygulanır, parçalar arasında oluşan sürtünme kuvveti gözardı edilebilir seviyelerde olduğu için hesaplamalara katılmamıştır. Şekil 3.33'de etkiyen kuvvetler teknik resim üzerinde gösterilmiştir. Sürtünme kuvveti yatay uygulamadan değişik olarak kremayer dişli ağırlığı ile dikey yüzey arasında oluşur. Denklem 3.11'e kremayer dişli ağırlık kuvveti eklenerek denklem 3.11a elde edilir, dikey uygulama için gerekli motor torku değeri bu denklem kullanarak bulunur.



Şekil 3.33: İkinci Robotik Tutucu Tasarımı Dikey Yönde Etkiyen Kuvvetler

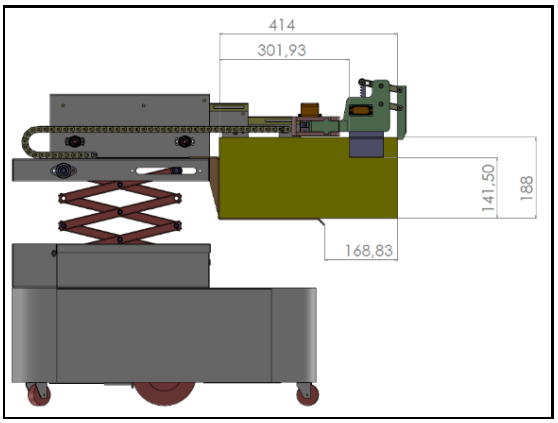
$$m_{kd}=10{,}89 \text{ gr}$$

$$T_{p4} = \left(m_{kd} \times g \times \mu \times r_p\right) + \left(\frac{1}{2} \times m_p \times {r_p}^2 \times \frac{\Delta\omega}{\Delta t}\right) + \left(m_{kd} \times g\right) \qquad \textbf{(3.11a)}$$

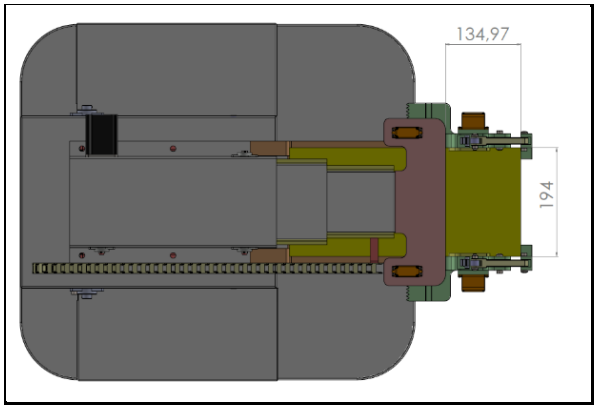
$$T_{p4} = (0{,}01 \times 9{,}81 \times 0{,}4 \times 11{,}34) + \left(\frac{1}{2} \times 0{,}0045 \times 11{,}34^2 \times \frac{5{,}23}{1}\right) + (0{,}01 \times 9{,}81)$$

$$T_{p4} = 2{,}05 \text{ Nmm}$$

833,56 Nmm torka sahip MG995 servo motoru dikey uygulama için de kullanılabilir.



Şekil 3.34: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-1



Şekil 3.35: İkinci Robotik Tutucu Tasarımının Kavrayabileceği Maksimum Nesne Ölçüleri Teknik Resmi-2

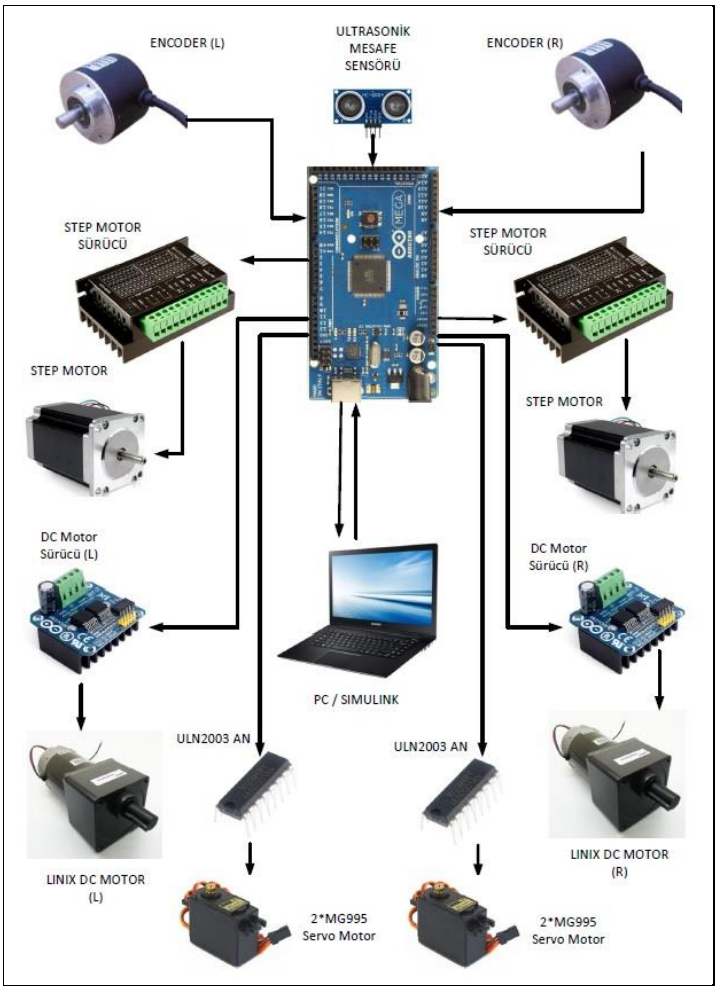
İkinci paralel çeneli robotik tutucu tasarımında, şekil 3.34 ve şekil 3.35'de görüldüğü üzere kavrayabileceği maksimum kutu ölçüleri 194 mm genişlik, 414 mm uzunluk, 188 mm yükseklikliktir. Çizelge 3.2'de yapılan iki robotik tutucu sistemlerin tasarım kabiliyetleri hedef değerler ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Birinci tasarımın kutu uzunluk hedef değerini sağlayamadığı görülmektedir. Geliştirilen ikinci tasarım diğer parametreleri sağladığı gibi kutu uzunluk değerinin 1,6 katını sağladığı için tercih edilmiştir.

Çizelge 3.2: Gerçekleştirilen Tasarımların Sonuç Parametreleri

Tasarım Parametreleri	Birinci Tasarım	İkinci Tasarım	Hedef Değer
Maksimum Taşıyabileceği Yük	1,185 kg	1,27 kg	1 kg
Maksimum Kutu Hacmi (En, Boy, Yükseklik) mm^3	194×123×226	194×414×188	180×250×100
Taşınacak Nesne Materyali	Karton	Karton	Karton
Robotik Tutucu Sistem Ağırlığı	0,815 kg	0,73 kg	1 kg

3.2 Elektrik-Elektronik Alt Sistem Tasarımı

Elektrik-elektronik alt sistemler elektrik motorları, elektrik motor sürücüleri, kontrolcü kartlarından oluşmaktadır. Sensörler vasıtası ile alınan datalar kontrolcü kartı üzerinden bilgisayara aktarılır. Alınan datalar bilgisayar üzerinde geliştirilmiş algoritmalara girdi sağlarlar hareket denklemleri içerisinde işlenen datalar sonucu çıkış sinyalleri kontrolcü kartı çıkış sinyal portlarına gönderilir ve motor sürücüleri vasıtası ile mekanizmaların istenilen konum kontrollerinin yapılması sağlanır.



Şekil 3.36: Mobil Depo Robotu Elektrik-Elektronik Kontrol Şeması

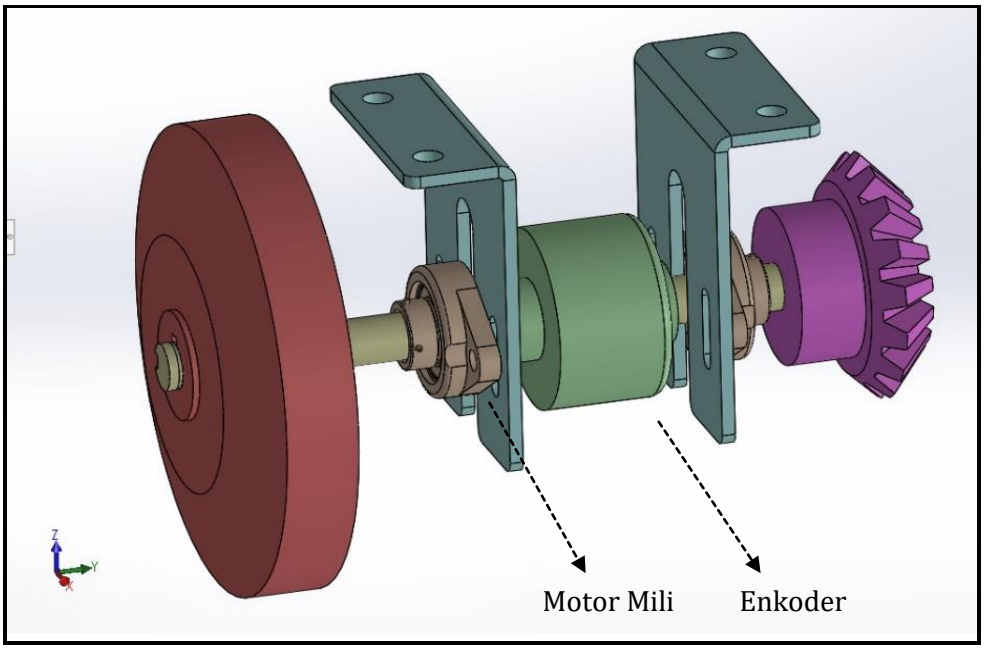
Şekil 3.36'da tezde bahsi geçen mekanik alt sistem tasarımlarının elektrik-elektronik kontrol şeması yer almaktadır. Sistemde kullanılan sensörler ultrasonik mesafe sensörü ve iki tekerlek için bağımsız data gönderen enkoderlerdir. Eyleyici olarak teleskobik mekanizma ve kaldırma mekanizması için iki adet step motor kullanılmıştır. Robotik tutucu sistemi için dört adet daha az tork değerlerine sahip

servo motor kullanılmıştır. Mekanik şasi tekerlerini bağımsız olarak sürebilen tahrik motorları DC motor olarak seçilmiş ve sürücü ile kontrolleri sağlanmıştır.



Şekil 3.37: Enkoder

Sistemde şekil 3.37'de görüldüğü üzere iki adet delik şaftlı enkoder kullanılmıştır. İki adet enkoder, mobil robot kendi etrafında açısal hareket yaparken açı kontrolü yapılabilmesi için doğrusal hareket ederken mesafe kontrolü yapılabilmesi için kullanılmıştır.



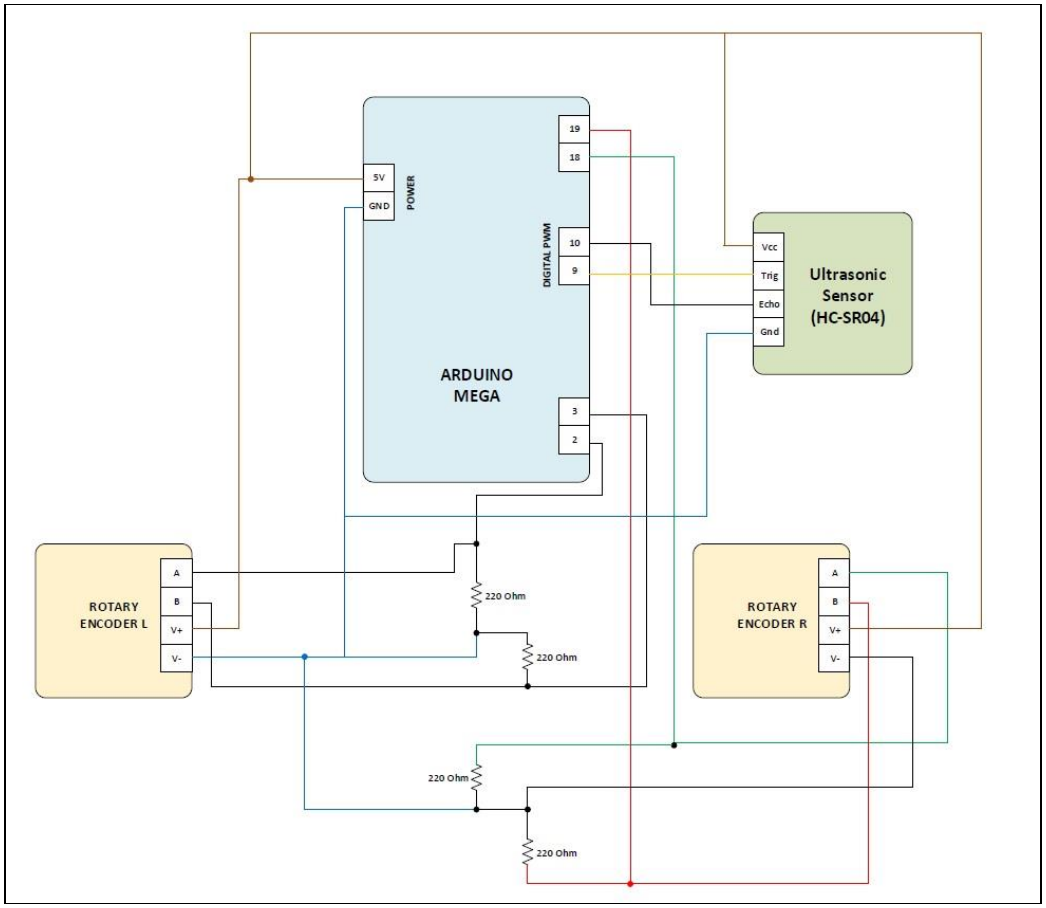
Şekil 3.38: Enkoder Mekanik Şasi Montaj Yerleşimi

Şekil 3.38'de mekanik şasi içerisindeki enkoder yerleşimi görülmektedir. Enkoder motor miline rijit olarak bağlanır ve motor milindeki tur değeri enkoder üzerinden okunur.



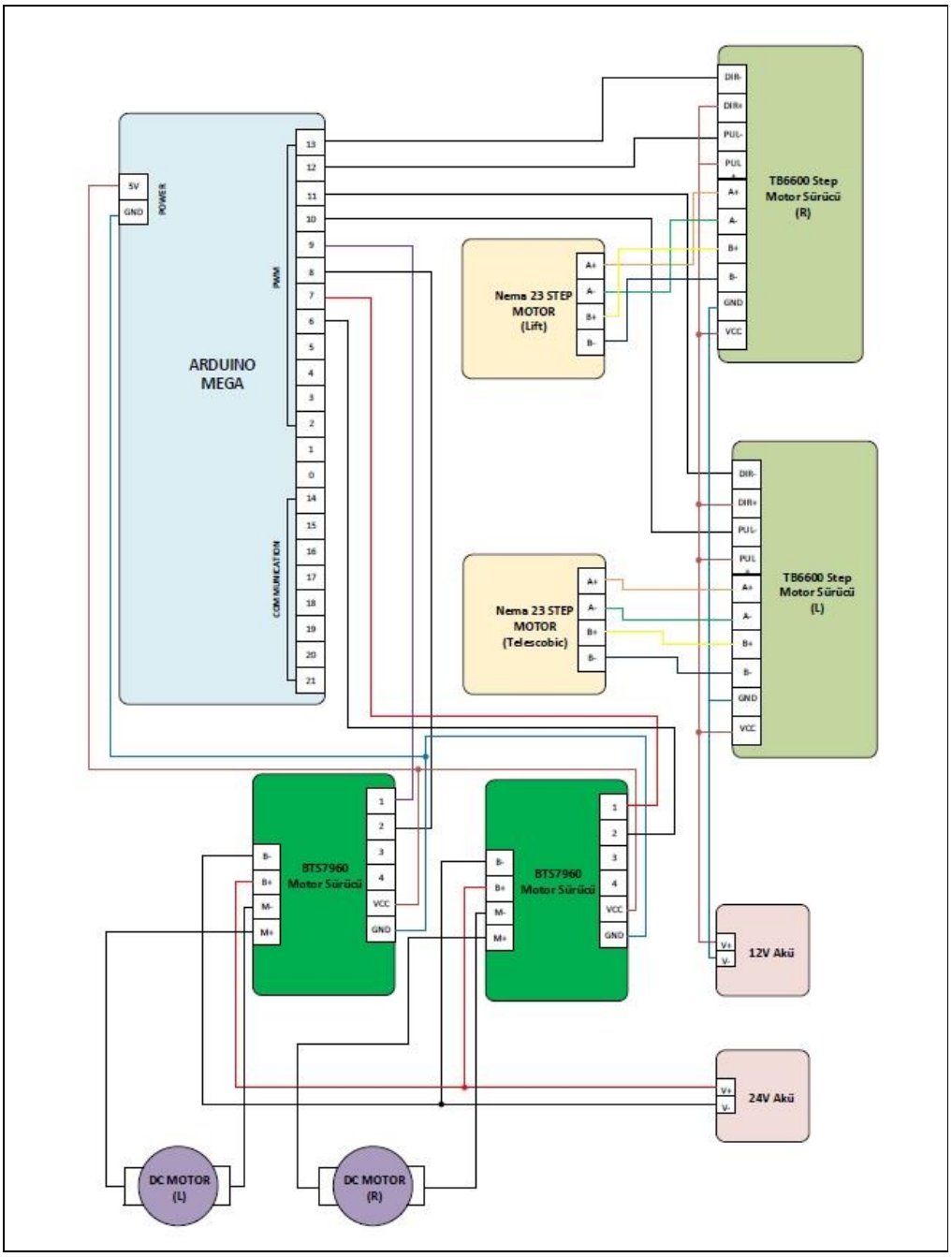
Şekil 3.39: Ultrasonik Mesafe Sensörü

Ultrasonik mesafe sensörü şasi ile yanaşacağı yüzey arasındaki mesafe değerini ölçer. Şasinin ürünü alacağı alana istenen uzaklıkta durmasını sağlayan datalar şekil 3.40'da görülen ultrasonik mesafe sensörlerinden alınırlar.



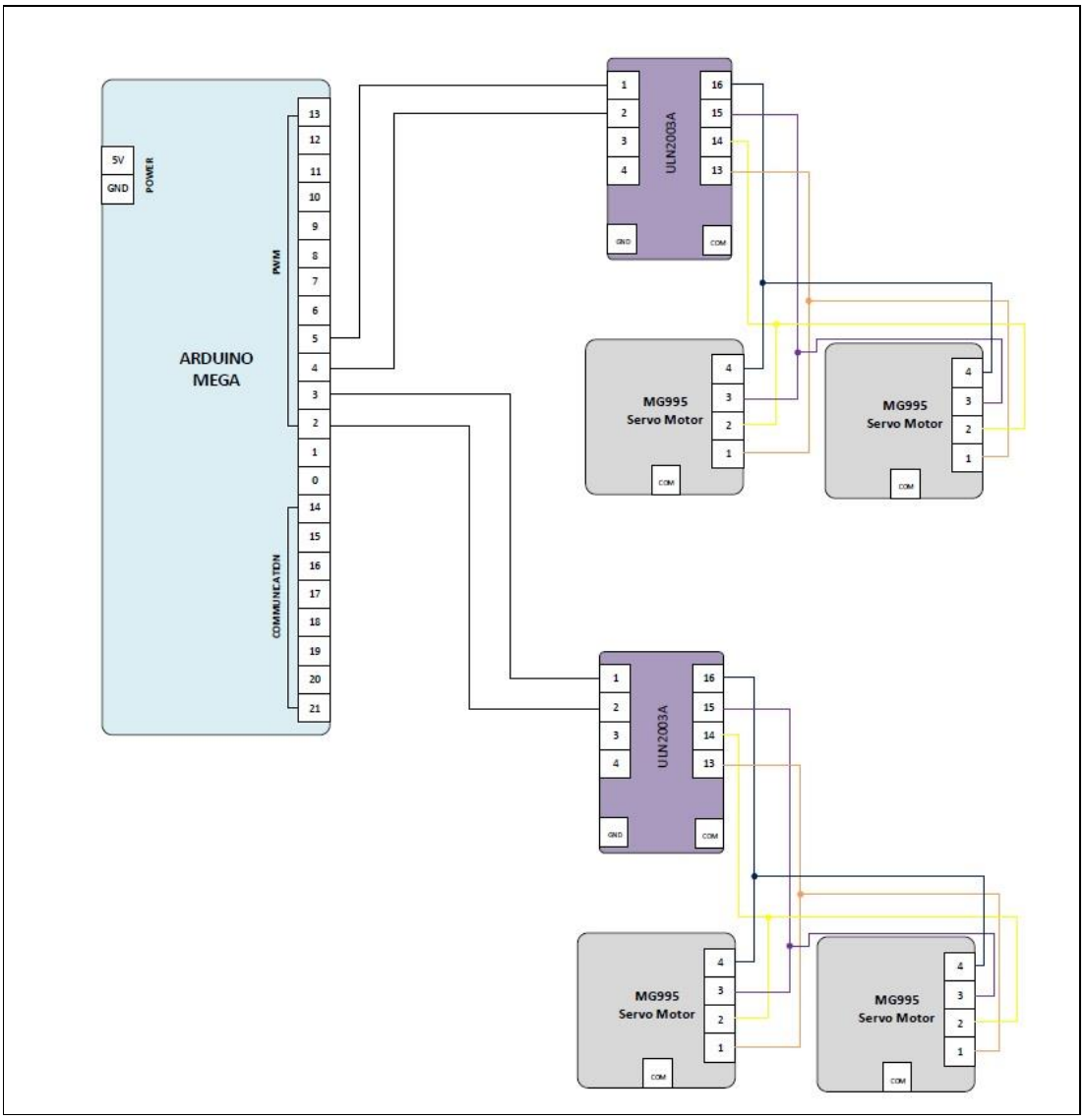
Şekil 3.40: Kontrolcü Kartı Sensör Girişleri Devre Şeması

Şekil 3.40'da enkoder ve mesafe sensörünün arduino mega kontrolcü kartına yapılan fiziksel girişlerinin devre şeması görülmektedir.



Şekil 3.41: Teleskobik ve Kaldırma Mekanizması Tahrik Motorları Devre Şeması

Teleskobik mekanizma bir adet step motor (Nema 23-2,2 Nm) ile kaldırma sistemi mekanizması bir adet step motor (Nema 34-4,5 Nm) ile tahrik edilmektedir. Nema 23 step motorunun mekanik yük altında çektiği akım değeri 3A'dir, Nema 34 step motorunun mekanik yük altında çektiği akım değeri 4,2A'dir bu sebepten ötürü Şekil 3.42'de görüldüğü üzere bu akım değerlerini sağlayabilecek TB6600 step motor sürücüsü step motorları sürmek için seçilmiştir.



Şekil 3.42: Robotik Tutucu Sistem Tahrik Motorları Devre Şeması

Robotik tutucu sisteminde dört adet servo motor(MG995-883Nmm) kullanılmaktadır. Mekanizmada çene açma ve tırnak indirme hareketlerini yapan eşlenik servo motorlar birlikte çalıştığı için Şekil 3.42'da görüldüğü gibi bir adet servo motor sürücü iki adet servo motoru sürmektedir. Kontrol sistem tasarımı ve matematiksel modeli "MATLAB-Simulink" programı vasıtası ile gerçekleştirilmiştir.

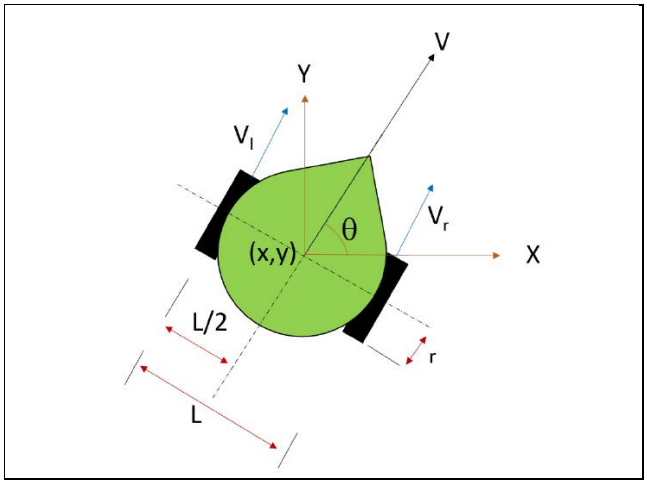
3.3 Kontrol Alt Sistem Tasarımı

Diferansiyel tahrikli bir mobil robot şekil 3.43'de gösterildiği gibi kontrol edilebilir iki tekerleğe sahiptir. Mobil robotun manevra hareket kontrolünü sağlayabilmek için robot doğrusal hızı V ve robot açısal dönüklüğü ile ilgili bilgi veren kafa hareketi ø parametrelerine ihtiyaç vardır. Robotun hız ve açısal oryantasyon bilgileri kontrol

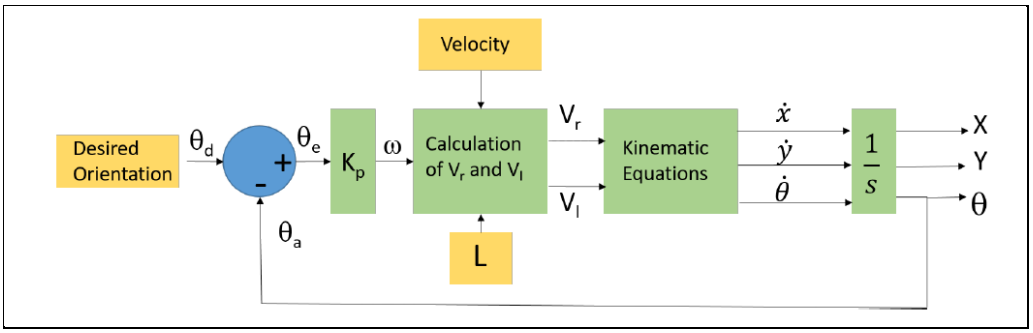
edilerek yol planlama ve hareket kontrolü gerçekleştirilebilir. Şekil 3.43'de diferansiyel tahrikli robotun şematik gösterimi görülmektedir. V_r sağ teker hızını, V_l sol teker hızını, L teker merkezleri arasındaki uzunluğu, θ referans koordinat sistemine göre robotun pozisyon açısını belirtmektedir, r teker yarıçapıdır. Robotun hızı, denklem 3.12'de görüldüğü üzere sağ ve sol tekerlerin ortalama hızları alınarak bulunur.

$$V = \frac{V_r + V_l}{2} \tag{3.12}$$

Robot hareket modellemesi yapılırken, robotun sabit hız ile hareket ettiği, robot manevra hareketlerinin kısa zamanlar içerisinde gerçekleştiği ve bu süreç boyunca V_r, V_l hızlarının sabit olduğu, robot tekerlerinde kaymanın gerçekleşmediği ve hareket ettiği zeminin düz olduğu yaklaşımları kabul edilmiştir.



Şekil 3.43: Diferansiyel Tahrikli Mobil Robotun Hareket Parametreleri [23]



Şekil 3.44: Mobil Robot Kontrol Sistemi Blok Diyagramı [23]

Şekil 3.44'de robot kontrol sisteminin blok diyagramı gösterilmektedir. Robotun belirli bir oryantasyon açısı ø ile sabit hızda hareket etmesi istenir. Sağ ve sol teker hızları V_r, V_l kinematik denklemi ile hesaplanarak robotun doğrusal ve açısal hızları

elde edilir [24]. Açısal hızın integrali alınarak oryantasyon açısı elde edilir ve kapalı çevrim kontrol sistemine geri besleme olarak tekrar verilir. Bu şekilde sistem kararlılığı arttırılmış olur. Kontrol sistem blokları daha sonraki bölümlerde daha detaylı açıklanacaktır.

3.3.1 Mobil robotun kinematik hareket denklemleri

Kinematik; cisim kütlesi ve harekete sebep olabilecek dış kuvvetler hesaba katılmadan noktasal bir mekanik hareketi tanımlayan klasik mekaniğin bir dalıdır. Kinematik denklemler, hareket denklemini polar koordinat sisteminden (r, ø) kartezyen koordinat sistemine (x, y) dönüştürmek için kullanılırlar.

Daha önce de bahsedildiği gibi mobil robot hareketini tanımlamak için gerekli sistem girdileri doğrusal hız (V) ve robot pozisyon açısı (ø) parametreleridir. Mobil robotun x eksenindeki pozisyon değişiklikleri ($\dot{x}$) ve y eksenindeki pozisyon değişiklikleri ($\dot{y}$) 3.13 ve 3.14 denklemleri kullanılarak elde edilir.

$$\dot{x} = V\cos(\theta) \tag{3.13}$$

$$\dot{y} = V\sin(\theta) \tag{3.14}$$

Robot açısal hızı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{(V_r - V_l)}{L} \tag{3.15}$$

Denklem 3.12'deki hız denklemini, denklem 3.13 ve 3.14'de yerine koyarsak;

$$\dot{x} = \frac{(V_r + V_l)}{2} \times \cos(\theta) \tag{3.13a}$$

$$\dot{y} = \frac{(V_r + V_l)}{2} \times \sin(\theta) \tag{3.14a}$$

Böylece referans koordinat sistemine göre robot hızı (V) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V = \sqrt{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)} \tag{3.16}$$

Denklem 3.13a ve 3.14a kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V = \sqrt{\left(\left(\frac{V_r + V_l}{2}\right)\cos\theta + \left(\frac{V_r + V_l}{2}\right)\sin\theta\right)} = \frac{V_r + V_l}{2}$$

Denklem 3.15 ve denklem 3.12 kullanılarak aşağıdaki gibi ifade edilir

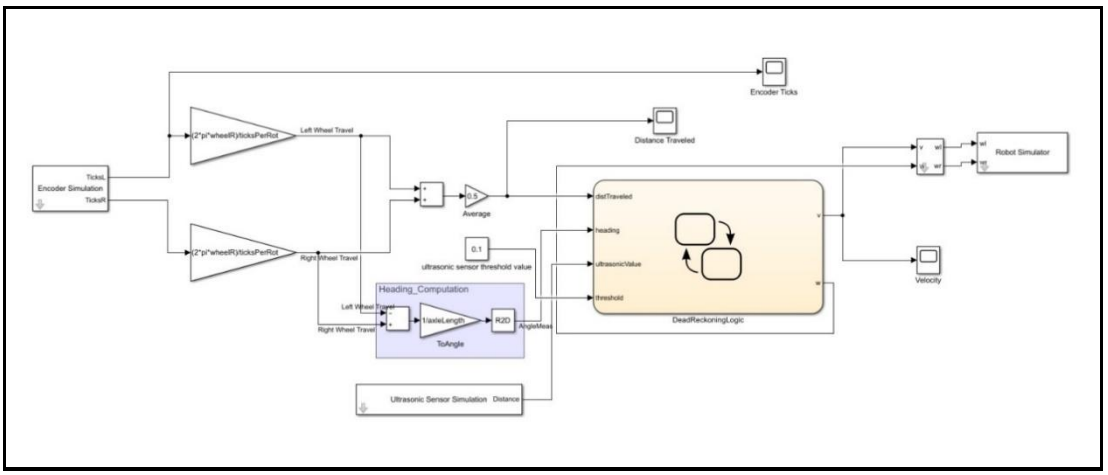
$$V_r = \left(V + \frac{L}{2} \times \omega\right) \tag{3.17}$$

$$V_l = \left(V - \frac{L}{2} \times \omega\right) \quad \textbf{(3.17a)}$$

Hesaplanan V_r ve V_l parametreleri denklem 3.13, 3.15a ve 3.15 kullanılarak $\dot{x}$, $\dot{y}$, ω parametreleri bulunur. Bulunan değerlerin integrali alınarak x, y pozisyonları ve pozisyon açısı (θ) bulunur. "MATLAB-Simulink" yazılımında integral alma işlemleri "To wlwr" blok parametresi ile yapılmıştır.

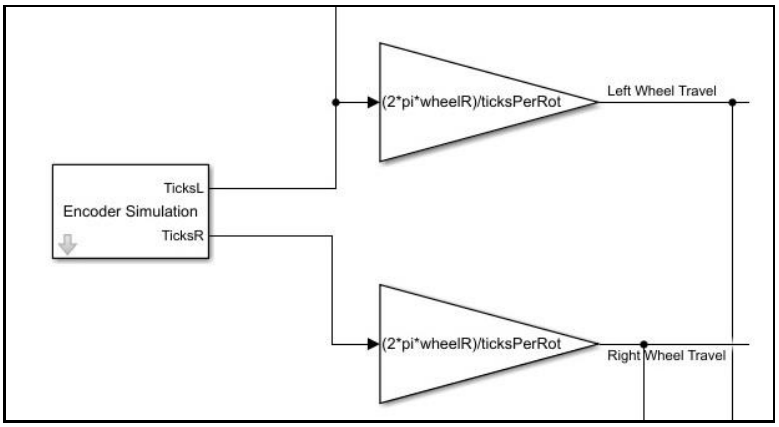
3.3.2 Mobil robotun hareket kontrol sistem yazılımı

Bir önceki bölümlerde belirtilen matematik denklemlerin girdisi ile oluşturulan "MATLAB-Simulink" yazılımından elde edilen mobil robot kontrol modeli Şekil 3.45'te gösterilmiştir.



Şekil 3.45: Mobil Robotun Hareket Kontrol Modeli

Kontrol blok diyagramı açık çevrim şeklinde oluşturulmuştur. Şekil 3.46'da görüldüğü üzere sağ ve sol tekerlek millerine yerleştirilen enkoderlerden alınan "tick" değerleri kullanılarak sol ve sağ tekerleklerin aldıkları yol miktarları hesaplanmıştır.



Şekil 3.46: Mobil Robotun Tekerlek Kontrol Modeli

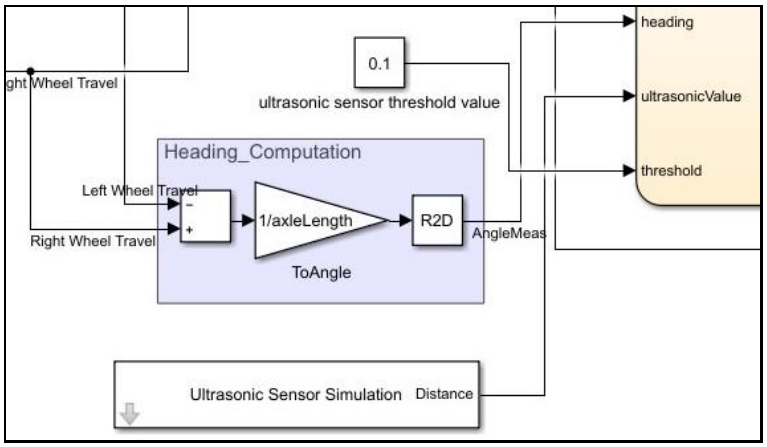
$$X_L = \frac{2\times\pi\times r_{LW}\times t_L}{T_{pr}} \quad \textbf{(3.18a)}$$

$$X_R = \frac{2\times\pi\times r_{RW}\times t_R}{T_{pr}} \quad \textbf{(3.18b)}$$

$$X_T = \frac{(X_L+X_R)}{2} \quad \textbf{(3.19)}$$

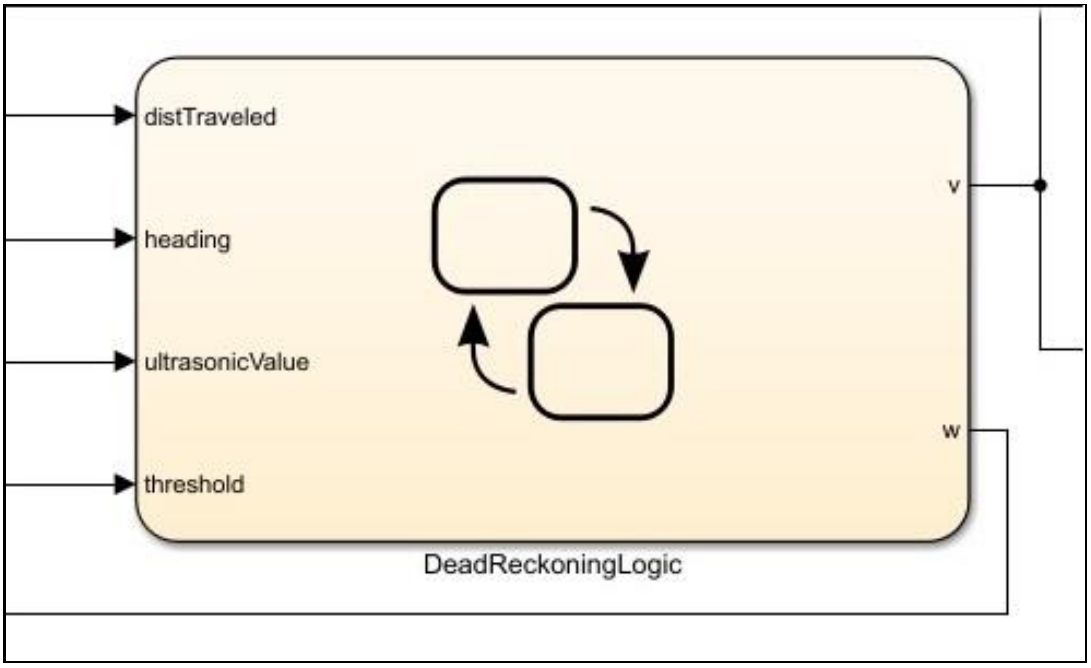
Denklem 3.18a'da mobil robotun sağ tekerinin aldığı yol miktarı (X_R), denklem 3.18b'de sol tekerin aldığı yol miktarı (X_L) hesapları görülmektedir. Teker yarıçapları (r_{LW}), (r_{RW}), enkoder yardımı ile tekerlerin sayma değerleri sol ve sağ tekerlek olmak üzere (t_L), (t_R) ve enkoderin bir turda saydığı "pulse" değeri (T_{pr}) olarak gösterilmiştir. Mobil robotun toplam aldığı yol miktarı (X_T), sol ve sağ tekerlerin aldığı yol miktarlarının toplamlarının yarısına eşittir. Şekil 3.48'de görülen kontrol bloğuna (X_T) verisi "distTraveled" olarak girilmiştir.

$$\theta_{heading} = \frac{(X_R-X_L)}{L} \quad \textbf{(3.20)}$$



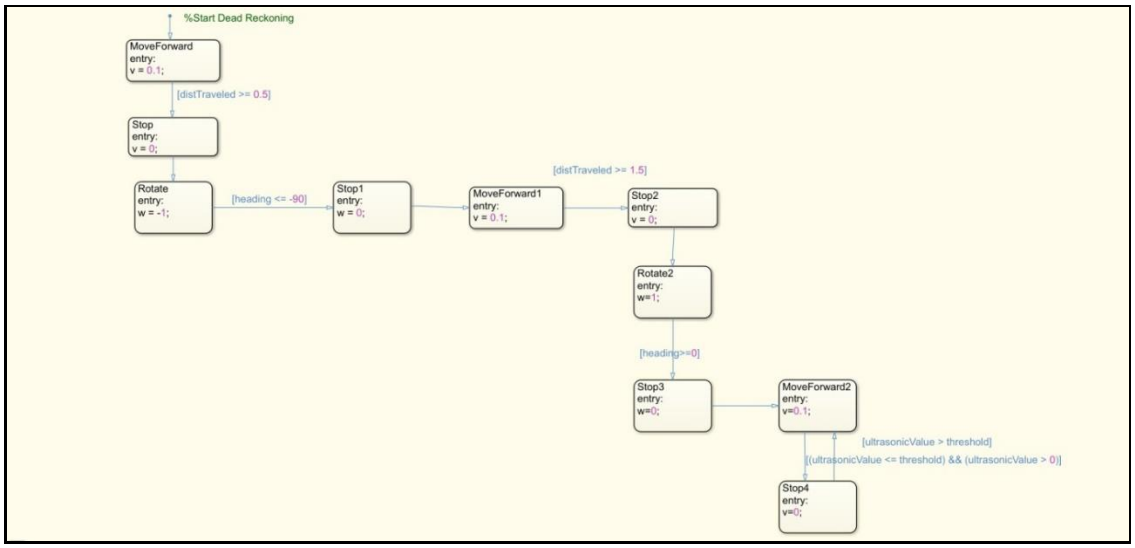
Şekil 3.47: Mobil Robotun Rota Açısı Kontrol Modeli

Mobil robot rota açısı ($\theta_{heading}$) denklem 3.20'deki gibi hesaplanmaktadır. $\theta_{heading}$ verisi Şekil 3.48'de görülen kontrol bloğuna "heading" parametresi olarak girilmiştir.



Şekil 3.48: MATLAB-Simulink "DeadReckoningLogic" Kontrol Bloğu

MATLAB-Simulink yazılımında bulunan "DeadReckonnig Logic" kontrol bloğu, mevcut pozisyonu bir önceki yakın zamanda hesaplanan pozisyon verisine göre veya sabit bir noktaya göre hesaplayıp, bu pozisyonu geçen zaman verisi ve bilinen veya hesaplanan hız verilerine göre ilerletme işlemidir. Mobil robot kontrol modelinde rota hesaplama işlemi "DeadReckoningLogic" kontrol bloğu kullanılarak yapılmıştır. "Dead Reckonnig Logic" kontrol bloğuna girdi olarak, hesaplanan yol miktarı "distTravel", rota açısı "heading", ultrasonik sensör verisi "ultrasonicValue", ultrasonik sensör eşik değeri "threshold" parametre olarak girilmiştir. Çıktı olarak ise açısal hız ve doğrusal hız değerleri hesaplanmıştır.

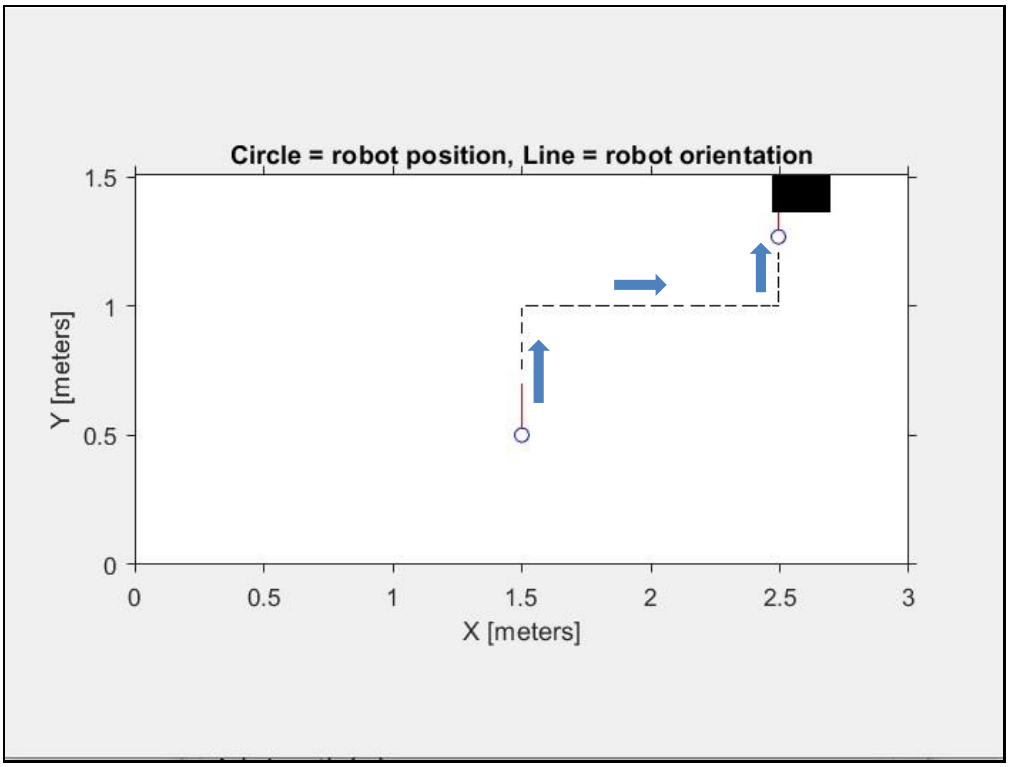


Şekil 3.49: MATLAB-Simulink "DeadReckoningLogic" Kontrol Bloğunun İç Döngüsü

Şekil 3.49'da mobil robot kontrol algoritmasının tamamı görülmektedir. İlk olarak tekerlek enkoder pulse değerlerine göre hesaplanan yol miktarı "distTravel" 0,5 m'ye ulaşana kadar 0,1 m/s doğrusal hız ile gider, 0,5 m'ye ulaştığı zaman durur. İkinci adımda -1 olan "w" açısal hız değeri ile rota açısı -90°'den küçük olana kadar robot dönme ekseninde döner. Üçüncü adımda rota açı değeri -90°'ye ulaştığı zaman durur. Dördüncü adımda 0,1 m/s doğrusal hız değeri ile başlangıç noktasına göre 1 m gittiği zaman doğrusal hız değeri 0 m/s olur. Beşinci adımda 1 olan "w" açısal hız değeri ile robot dönme ekseninde rota açısı 0°'ye eşit olana kadar döner, 0°'ye eşit olduğunda durur. Altıncı adımda 0,1 m/s olan doğrusal hız değeri ile hareket etmeye başlar, ultrasonik sensör ile ölçülen mesafe değeri "ultrasonicValue", robotun kargo kutusunu üzerine alma işlemini yapmadan önce rafa çarpmaması için belirlenen güvenli eşik değerine "threshold " eşit olduğunda durur ve makaslı kaldırma mekanizmasını ve üzerine alma işlemlerini gerçekleştirir.

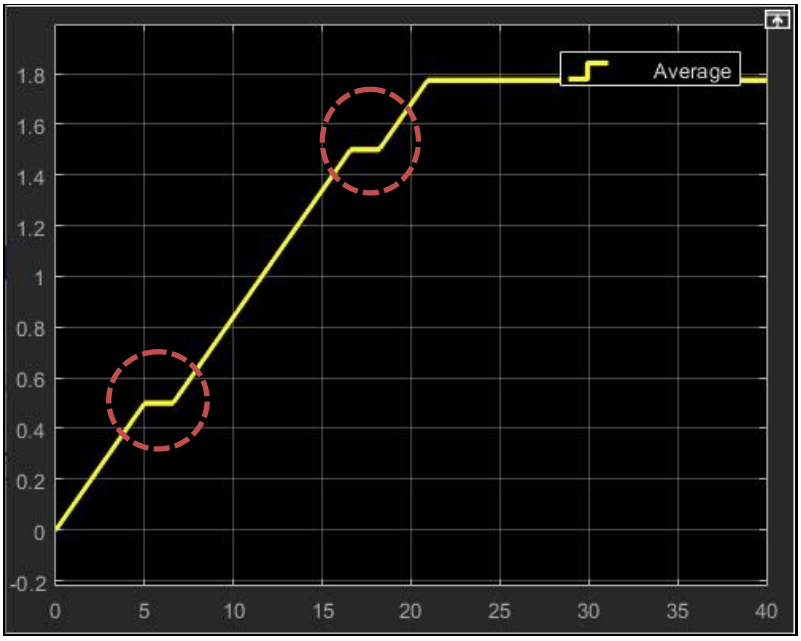
3.3.3 Mobil robotun hareket simülasyonu

Hareket simülasyonu için samplebased parametresi 40 olacak şekilde 40 iterasyon yapıldı. Mobil robotun aldığı mesafe, sol ve sağ tekerleklerin enkoder aracılığı ile saydığı değerler, açısal hız ve doğrusal hız değerleri incelendi. İki boyutlu mobil robot hareket simülasyonu gerçekleştirildi ve istenilen hareket fonksiyonlarının mobil robot tarafından sağlandığı görüldü.

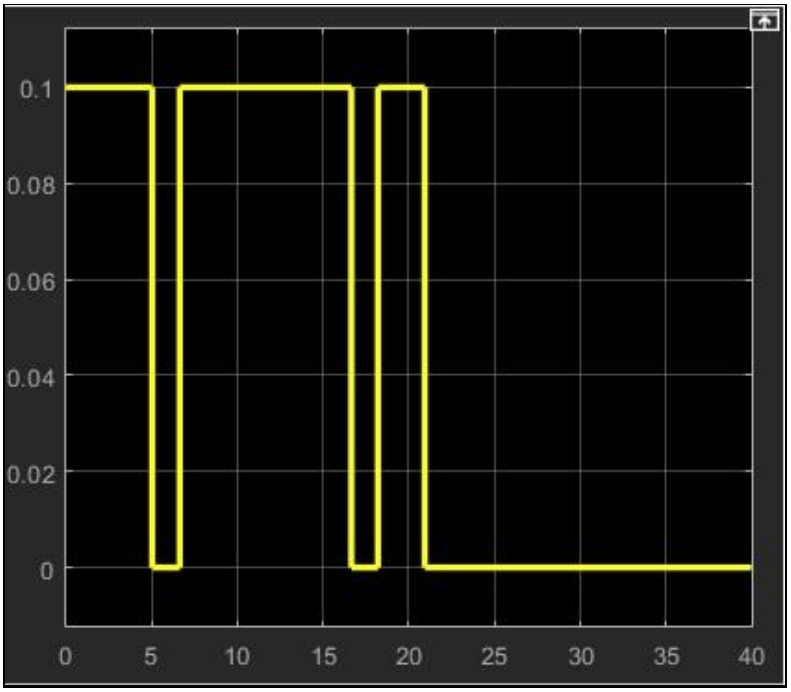


Şekil 3.50: Mobil Robotun Hareket Simülasyonu

Şekil 3.50'de mobil robotun hareket simülasyonunda, mobil robotun başlangıç (1.5,0.5), bitiş (2.5,1.8) koordinatları ve izlediği yol gösterilmektedir. Mobil robot, başlangıç koordinatlarından 0,5 m gösterilen doğrultuda doğrusal hareket yapmıştır. (1.5,1) koordinatlarını içeren dönme ekseni üzerinde 90° saat yönünde dönme hareketini tamamlamıştır. (1.5, 1) ile (2.5,1) koordinatları arasında 1 m doğrusal hareket yapmıştır. (2.5,1) koordinatlarını içeren dönme ekseni üzerinde 90° saat yönünün tersine dönüş hareketini tamamlamıştır. (2.5,1) ile (2.5,1.3) koordinatları arasında 0,3 m doğrusal hareket ederek ultrasonik mesafe sensörünün ölçtüğü değer ile eşik değeri arasındaki fark 0 oluncaya kadar hareketini sürdürmüş, 0 eşik değerini gördüğünde durmuştur. Şekil 3.51'de iki adet dönme hareketinin olduğu bölge kırmızı ile işaret içine alınmıştır, 0,5 m ve 1,5 m'de öngörüldüğü gibi konum değişikliği olmadığı görülmüştür. Bu bilgi robotun kendi ekseni etrafında döndüğünü göstermektedir. Alınan toplam mesafe daha önce "deadreckoning" kontrol bloğunda hesaplandığı üzere hareket simülasyonunda da 1,8 m olduğu görülmüştür.

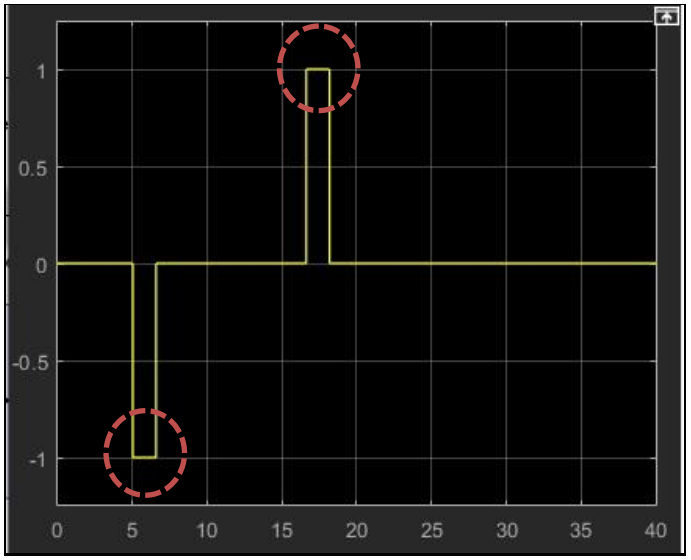


Şekil 3.51: Kontrol Edilen Mesafe Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi



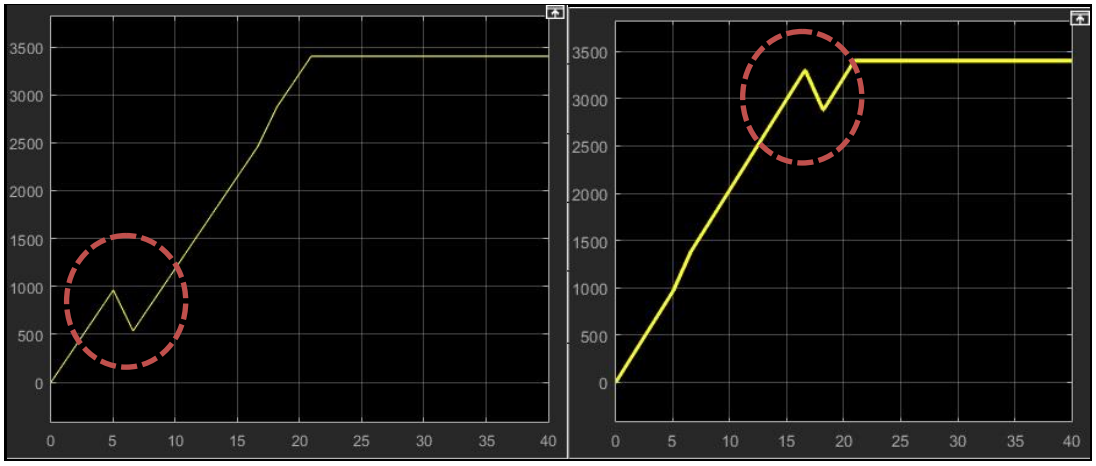
Şekil 3.52: Kontrol Edilen Doğrusal Hız Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi

Mobil robotun doğrusal hareket ettiği zamanlardaki hızının 0,1 m/s olduğu, durduğu ve dönme hareketini yaptığı zamanlardaki hızının ise 0 m/s olduğu Şekil 3.52'de görülmektedir.



Şekil 3.53: Kontrol Edilen Açısal Hız Parametresinin Zamana Bağlı Değişimi

Robot açısal hız değerinin doğrusal hareket ettiği durumlarda 0 mertebesinde, saat yönünde dönme hareketi yaptığı zamanlarda -1 mertebesinde, saat yönünün tersi yönde dönme hareketi yaptığı durumlarda ise 1 değerini aldığı Şekil 3.53'de görülmektedir.



Şekil 3.54: Kontrol Edilen Sağ ve Sol Enkoder Pulse Değerlerinin Zamana Bağlı Değişimi

Şekil 3.54'de bütün hareket boyunca sağ ve sol tekerlek enkoder pulse değerlerini gösteren simülasyon grafikleri görülmektedir. Birinci dönüş bölgesinde sağ teker sol tekere göre ters hareket etmektedir, ikinci dönüş bölgesinde sol teker sağ tekere göre ters yönde hareket etmektedir.

4. OTONOM MOBİL DEPO ROBOTU SİSTEM ENTEGRASYONU

4.1 Sistem Entegrasyonu

Mobil depo robotunun mekanik alt sistemleri olarak geliştirilen tekerlek tahrik sisteminin mekanik şasi ile sistem entegrasyonu sağlanır. Sistem entegrasyonu yapılan bu iki alt sistem üzerine makaslı kaldırma sistemi montajı gerçekleştirilir. Makaslı kaldırma sisteminin üst plaka bölgesine teleskobik mekanizma sistemi montajı gerçekleştirilir. Teleskobik mekanizma alt sistemi üzerine uç eyleyici olarak paralel çeneli robotik tutucu sistemi entegre edilir. Mekanik alt sistemlerin birbiri ile entegrasyonu tamamlandıktan sonra elektrik-elektronik alt sistemlerin montajı gerçekleştirilen mekanik yapıya entegrasyonu sağlanır. Şekil 4.1'de sistem entegrasyonu sağlanmış olan mobil depo robotunun prototip uygulaması görülmektedir.



Şekil 4.1: Sistem Entegrasyonu Sağlanan Mobil Robotun Prototipi

4.2 Prototip Geliştirme

Enkoder, tekerlek, akü, yataklı rulman ve düz konik dişliler hazır olarak tedarik edilmiştir. Tekerlek milinin yataklanmasını sağlayan ve DC motorun montajını sağlayan yardımcı braketler ve braketlerin üzerine montaj edildiği ana plaka ST52 standardına uygun DKP saç malzemeden imal edilmiştir. Mekanik şasi saç imalatı, abkant pres makinaları kullanılarak büküm yöntemi ile ST52 standardına uygun DKP saç malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Radyüs verilmiş dönüş plakalarının, büküm işlemi tamamlanmış saç parça ile kaynak uygulaması gerçekleştirilmiştir.

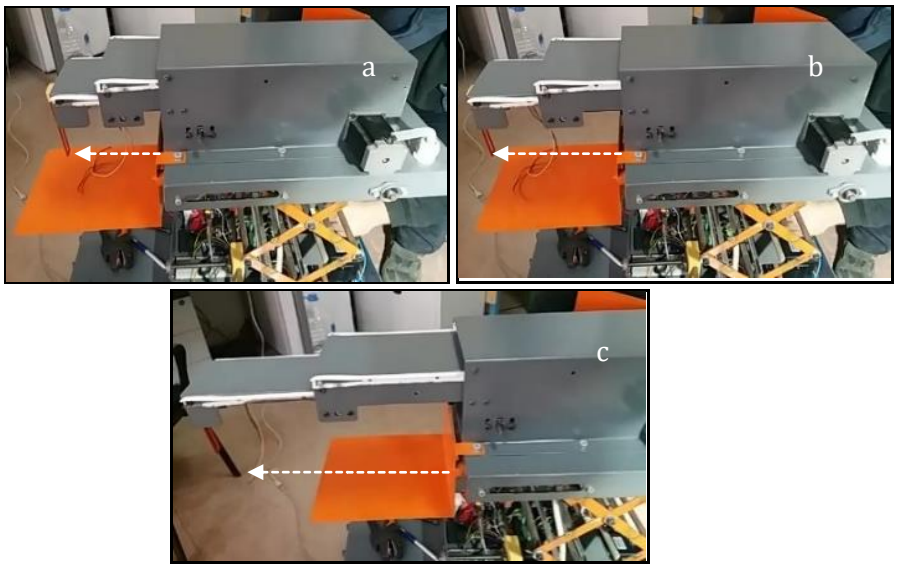


Şekil 4.2: Mekanik Şasi Prototip Montajı



Şekil 4.3: Poliüretan Kaplı Tekerlek

Şekil 4.2'de elektrik-elektronik ve mekanik alt komponentlerinin montajı tamamlanmış mekanik şasi alt sisteminin prototipi görülmektedir. Şekil 4.3'de prototip robot için kullanılan tekerlek gösterilmiştir. Robotun kendi ekseni etrafında dönme hareketini yaparken tekerlekler ile yol arasında oluşabilecek kayma sorununu en aza indirebilmek için poliüretan kaplı tekerlekler kullanılmıştır.



Şekil 4.4: Teleskobik Mekanizma Hareket Fonksiyon Testi : (a) Kapalı Konum. (b) Orta Konum. (c) Açık Konum.

Şekil 4.4'de teleskobik mekanizmanın hareket uygulamasını gösteren 3 adet görsel bulunmaktadır. Şekil 4.4(a) teleskobik mekanizmanın kapalı durumdaki konumunu, Şekil 4.4(b) teleskobik mekanizmanın bom yapılarının orta açık durumdaki konumunu, Şekil 4.4(c) teleskobik mekanizmanın bom yapılarının tam açık olduğu durumdaki konumları göstermektedir.



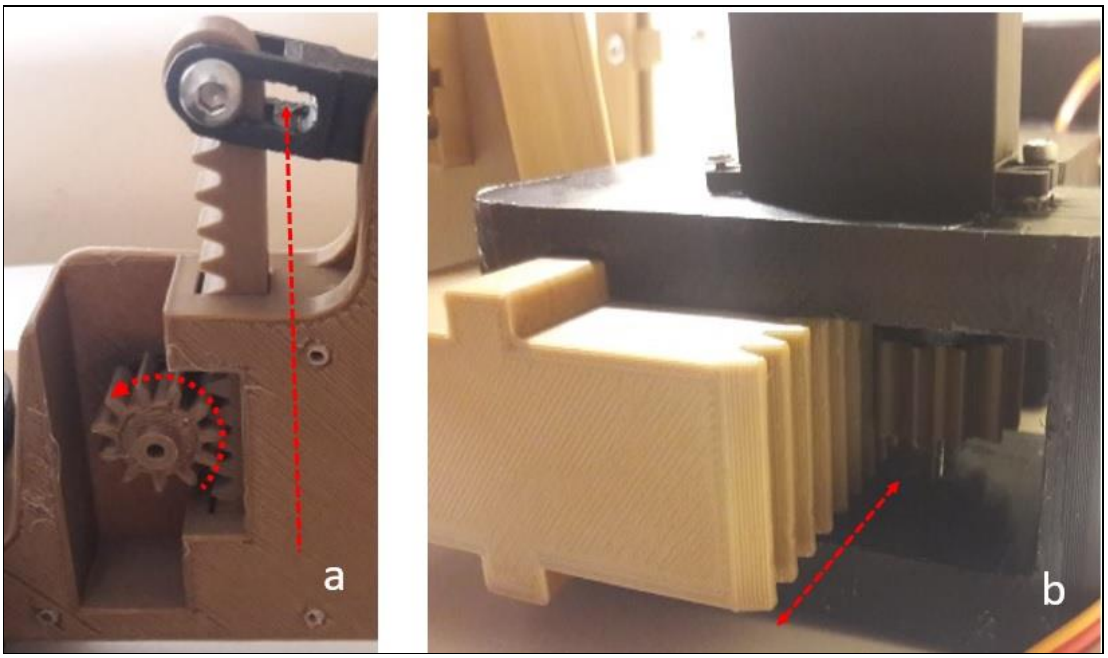
Şekil 4.5: Teleskobik Mekanizma Kutu Hareket Fonksiyon Testi : (a) Kutu Alınmadan Önceki Konum. (b) Kutu Alınma Sırasındaki Konum. (c) Kutu Alındıktan Sonraki Konum

Şekil 4.5'de görüldüğü üzere raftaki 18×10×25 mm^3 ölçülerinde 1kg ağırlığındaki kutunun robot tepsisi üzerine alınma hareket fonksiyonu test edilmiştir.

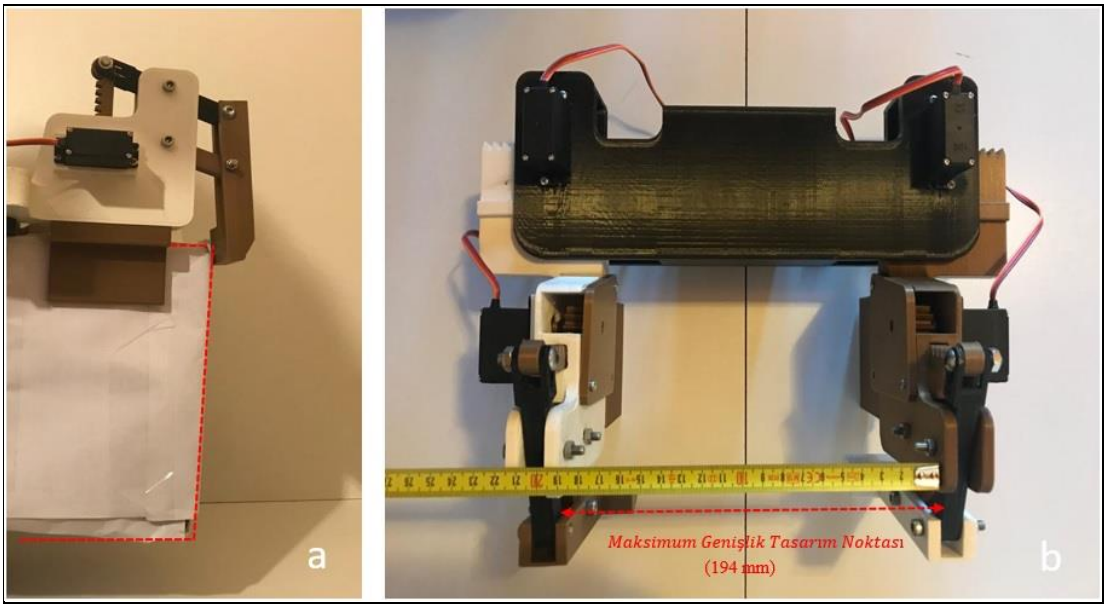


Şekil 4.6: Kaldırma Mekanizmasının Hareket Kontrolü Testi

Şekil 4.6'da makaslı kaldırma sisteminin yükseltilip sürüş testlerinin gerçekleştirildiği test görselleri görülmektedir.



Şekil 4.7: Robotik Tutucu Sistemin Dikey ve Yatay Kremayer Dişli Uygulaması : (a) Dikey Uygulama. (b) Yatay Uygulama



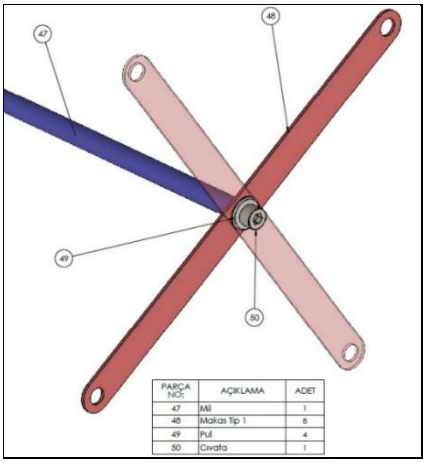
Şekil 4.8: Robotik Tutucu Sistem Prototipi : (a) Kutu Kavrama Hareketi. (b) Maksimum Kavrama Ölçüsü.

Şekil 4.8'de robotik tutucu sistemin maksimum kavrama yapabileceği 200 mm genişlik ölçüsü görülmektedir. Şekil 4.7'de robotik tutucu prototipinin dikey ve yatay kremayer dişli uygulama örneği görülmektedir.

5. ALT SİSTEMLERİN SAYISAL VE ANALİTİK ANALİZİ

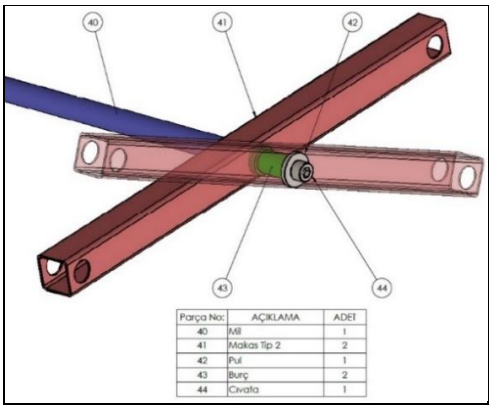
5.1 Makaslı Kaldırma Mekanizmasının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi

Makaslı kaldırma alt sistemi için iki farklı tasarıma sahip makas yapısı çalışılmıştır. İki adet makas tasarımının statik yapısal analizleri gerçekleştirilerek makas bağlantı noktalarında oluşan gerilme dağılımları incelenmiştir.



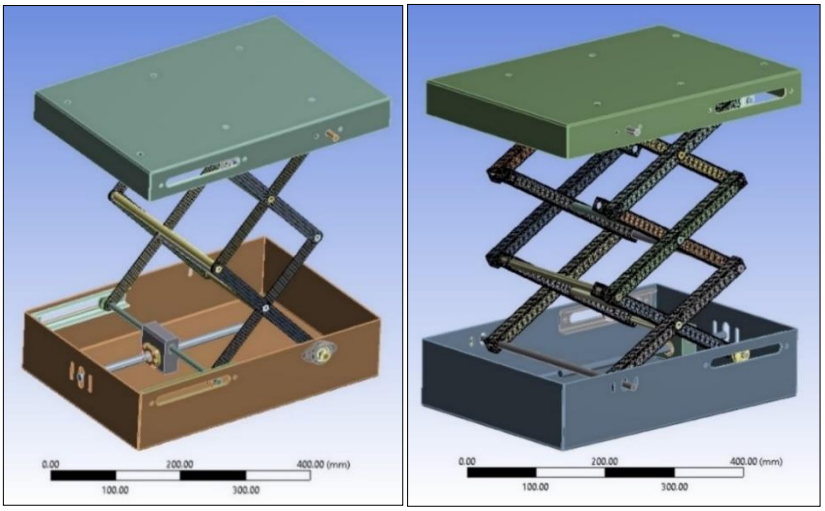
Şekil 5.1: Birinci Makas Tasarımı

Birinci makas tasarımında iki adet 3 mm kalınlığında, ST52 standardına uygun DKP saç malzemeden imal edilmiş makaslar kullanılmıştır. Şekil 5.1'de görüldüğü üzere makaslar, bağlantı delikleri ve bağlantı mili vasıtası ile yataklanmıştır.



Şekil 5.2: İkinci Makas Tasarımı

İkinci makas tasarımında iki adet 20×20×1 mm ölçülerinde, ST52 standardına uygun malzemeden yapılmış profiller kullanılmıştır. Şekil 5.2'de görüldüğü üzere makaslar, bağlantı delikleri, burç ve mil vasıtası ile yataklanmıştır. Makaslı kaldırma mekanizması, üstünde taşıdığı teleskobik mekanizma ve kaldıracağı yük miktarının toplam ağırlık değerine göre tasarlanmıştır. Hesaplanan kuvvet değerleri sınır koşulu olarak verilerek makas tasarımlarındaki gerilme dağılımları incelenip karşılaştırılmıştır. Yapısal analizler "ANSYS-Static Structural" paket programı ile gerçekleştirilmiştir.



(a) (b)

Şekil 5.3: Makaslı Kaldırma Sisteminin Hesaplama Ağı Modeli

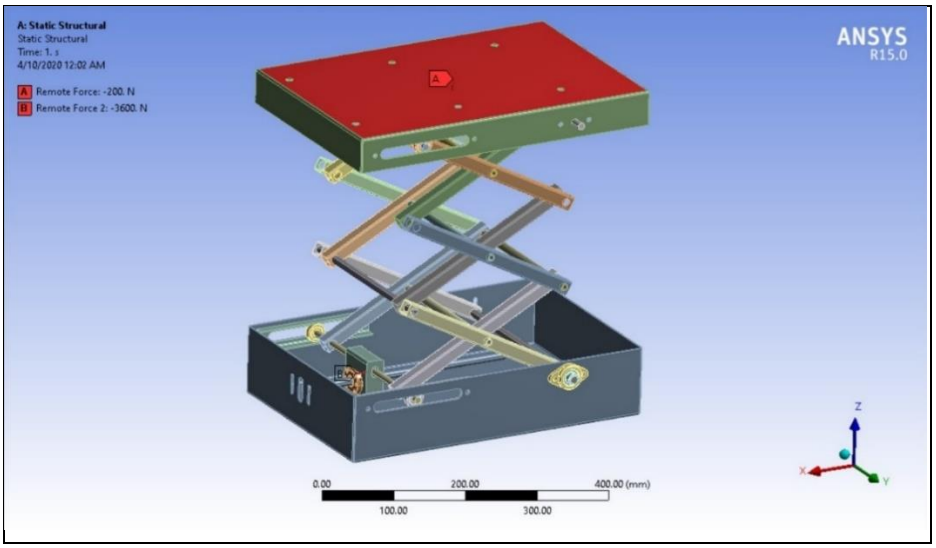
Çizelge 5.1: Makaslı Kaldırma Sisteminin Hesaplama Ağının Model Parametreleri

Parametre	Birinci Tasarım	İkinci Tasarım
Düğüm	15700	113843
Eleman	1857	55950
Malzeme	ST 52	ST 52
Hesaplama Ağı Tipi	Hexahedral	Tetrahedral

Şekil 5.3'de iki farklı makas tasarımı için uygulanan hesaplama ağ modeli ve Çizelge 5.1'de hesaplama ağı modelindeki düğüm sayısı, eleman sayısı, hesaplama ağı tipi ve atanan malzeme özellikleri görülmektedir. İki modelde de gözlemlenmek istenen komponentler makas yapılarıdır. Bu sebepten ötürü makas tasarımları "flexible" olarak modellenmiş diğer yardımcı komponentler "rigid" olarak modellenmiştir.

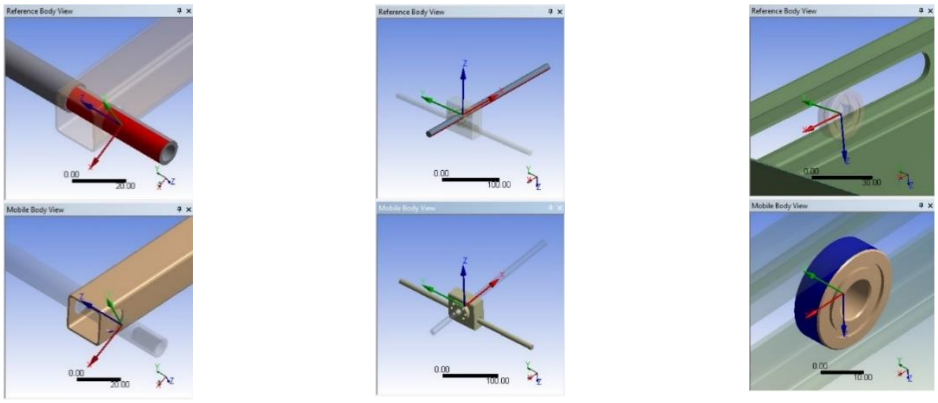
Çizelge 5.2: Statik Yapısal Analiz Modeli Malzeme Özellikleri

Young Modülü	210000 MPa
Poisson Oranı	0,303
Kütle Yoğunluğu	7,7 kg/m3



Şekil 5.4: Makaslı Kaldırma Sistemi Statik Yapısal Analiz Modeli

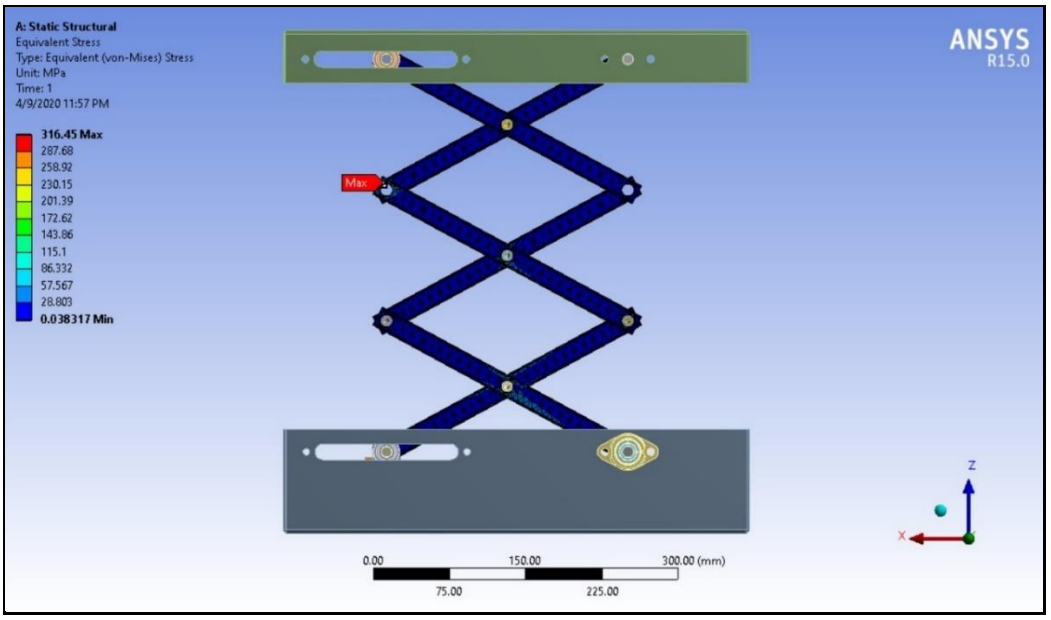
Şekil 5.4'de makaslı kaldırma sistemi statik analiz modelinin sınır koşulları gösterilmiştir. A noktasına sistemin taşıyacağı yükü temsilen teleskobik mekanizma ve taşıyacağı yük miktarının toplamına denk olarak 200 N kuvvet uygulanmıştır. B noktasına vidalı mil, vidalı mil somunu ve step motor yardımı ile x ekseninde negatif yönde oluşturulan ve makaslı sistemin z ekseninde hareket etmesini sağlayan eksenel kuvveti temsilen bir önceki bölümlerde hesaplanan 3600 N kuvvet değeri uygulanmıştır.



(a) (b) (c)

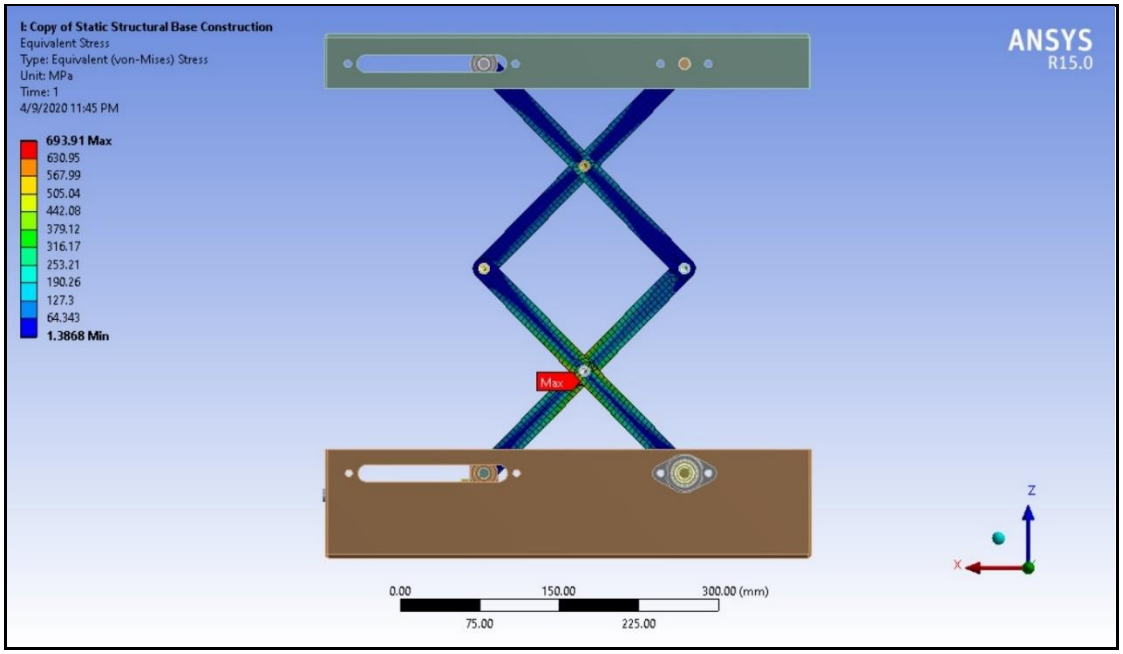
Şekil 5.5: Analiz Modeli Sınır Koşulu Bağlantı Tipleri

Şekil 5.5'de oluşturulan analiz modelindeki sınır koşulu bağlantı tipleri gösterilmiştir. Şekil 5.5(a)'da z ekseninde dönebilen, Şekil 5.5(b)'de x yönünde doğrusal hareket edebilen ve Şekil 5.5(c)'de y ekseninde dönebilen, x ekseninde doğrusal hareket edebilen sınır koşulu bağlantı tipleri görülmektedir.



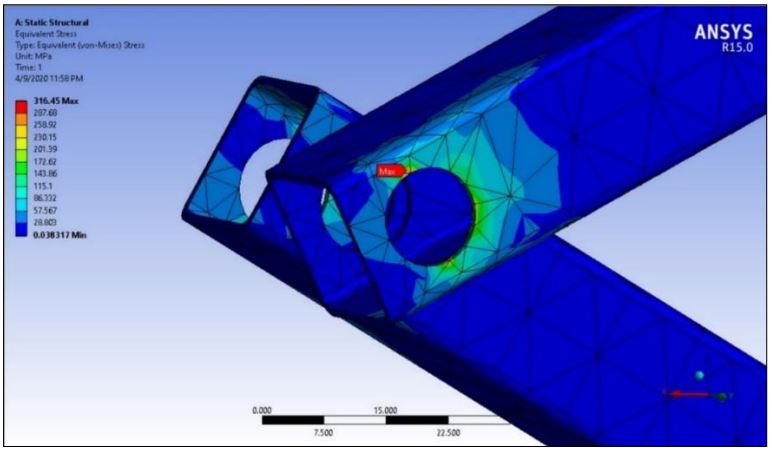
Şekil 5.6: İkinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı

Şekil 5.6'da geliştirilmiş ikinci tasarımın statik yapısal analizi sonucu elde edilen gerilme değerleri görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 316,45 MPa olup akma sınırının (355 MPa) altındadır.



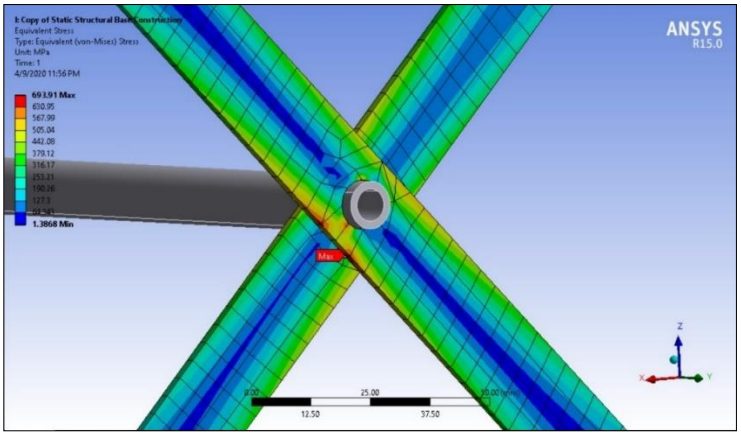
Şekil 5.7: Birinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı

Şekil 5.7'de birinci tasarımın statik yapısal analizi sonucu elde edilen gerilme değerleri görülmektedir. Makas yapısında akma sınırının (355 MPa) üstünde olan bölgeler olduğu görülmektedir. Maksimum gerilme değeri 639,391 MPa olarak görülmektedir.



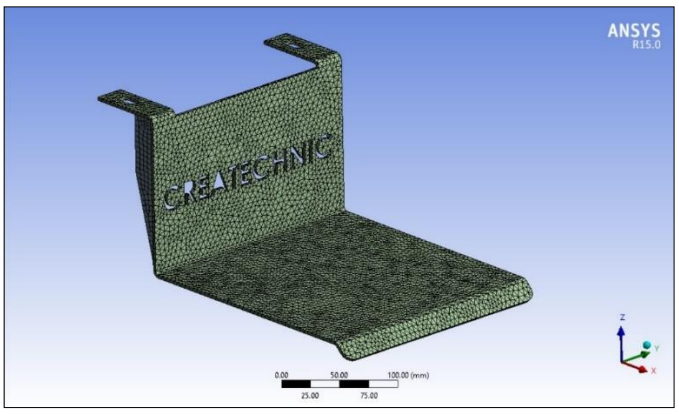
Şekil 5.8: İkinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı

Şekil 5.8'de maksimum gerilme değerinin görüldüğü makas yapısının bağlantı bölgesindeki gerilme dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.9: Birinci Makas Tasarımı Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı

Şekil 5.9'da maksimum gerilme değerinin görüldüğü bağlantı bölgesinin gerilme dağılımı görülmektedir.



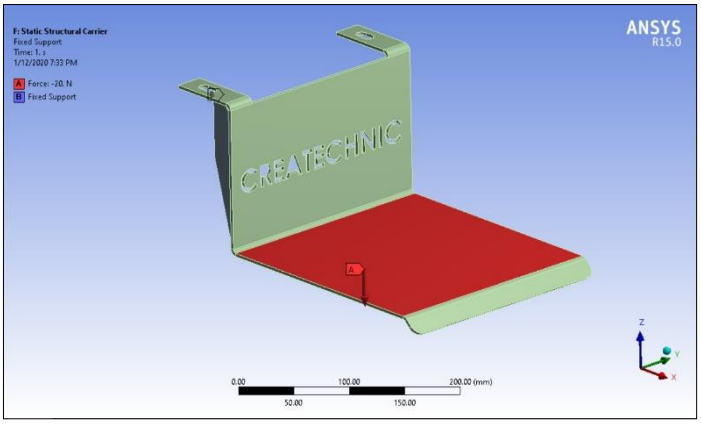
Şekil 5.10: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Hesaplama Ağı Modeli

Taşıyıcı plaka 2 kg yük taşımak üzere tasarlamıştır. Şekil 5.10'da taşıyıcı plaka hesaplama ağı modeli görülmektedir.

Çizelge 5.3: Taşıyıcı Plaka Tasarımı Analiz Parametreleri

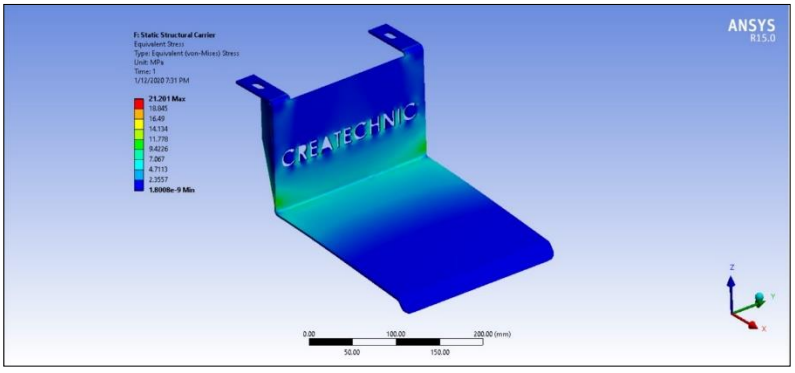
Düğüm Noktası	49935
Eleman	24086
Malzeme	ST52
Hesaplama Ağı Tipi	Tetrahedral

Şekil 5.10'da görülen tasarımın hesaplama ağı modeli Çizelge 5.3'de görüldüğü üzere 49935 düğüm noktası, 24086 elemanlı "tetrahedral" hesaplama ağı yapısına sahiptir.



Şekil 5.11: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Statik Yapısal Analiz Modeli

Şekil 5.11'de taşıyıcı plaka tasarımının statik yapısal analiz modelinin sınır koşulları gösterilmiştir. A noktasına taşıyacağı yükü temsilen 20 N kuvvet uygulanmıştır. B ile gösterilen taşıyıcı plaka iç yüzeyi "Fixed support" ile bağlanmıştır.

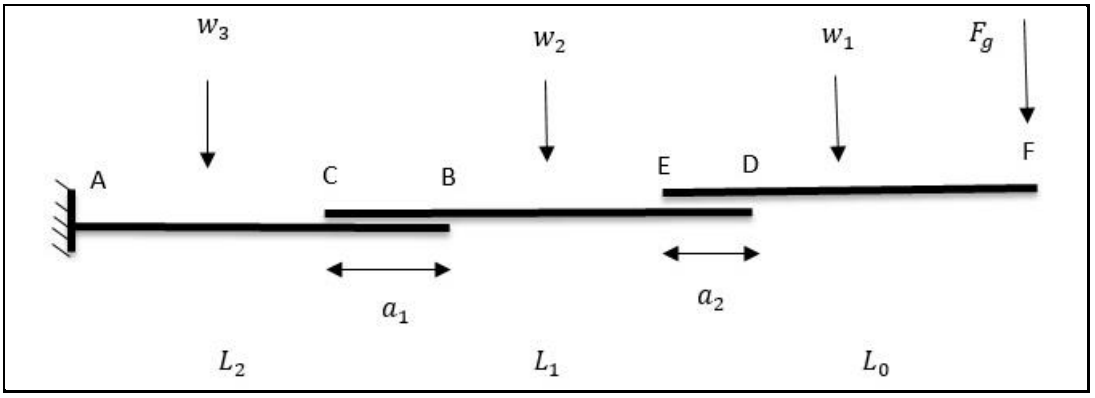


Şekil 5.12: Taşıyıcı Plaka Tasarımının Statik Yapısal Analizi Sonucu Gerilme Dağılımı

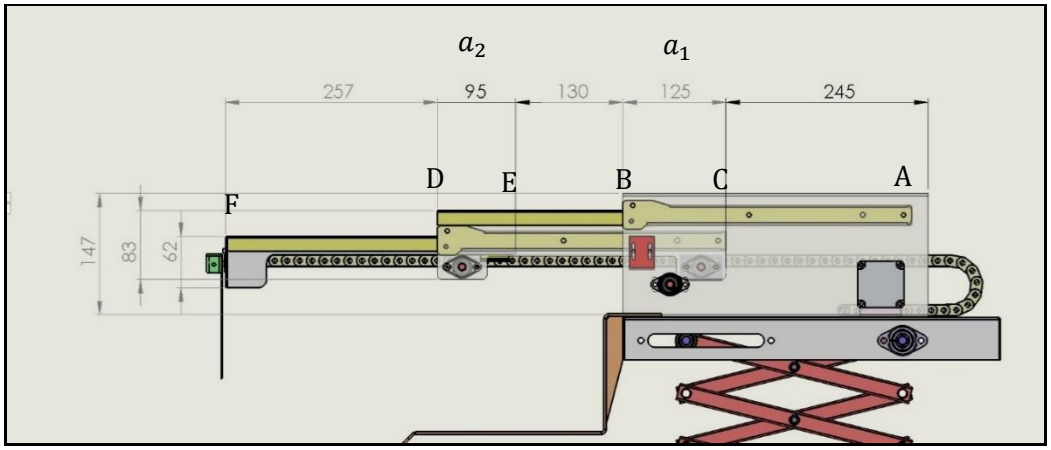
Şekil 5.12'de görüldüğü üzere maksimum gerilme değeri 21,201 MPa olup akma sınırının (355 MPa) altındadır.

5.2 Teleskopik Mekanizmanın Analitik Hesaplama Yöntemi ile Analizi

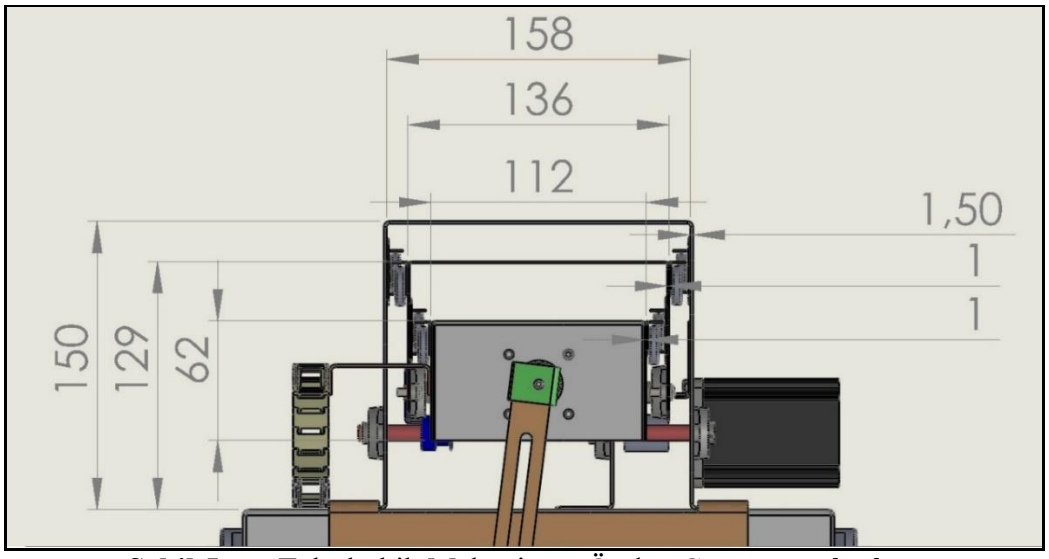
Teleskobik mekanizmanın matematiksel modeli için ilk olarak kesme kuvveti ve moment diyagramı çıkartılır [25]. Şekil 5.13'de teleskobik mekanizmanın kuvvet diyagramı görülmektedir. A noktası sabit mafsal yapısı olarak kabul edilmiştir. C, B ve E, D rakamları ile gösterilen kayar mekanizmanın olduğu yataklama noktaları için kuvvet ve gerilme değerleri analitik olarak hesaplanıp, analiz sonuçları ile doğrulaması sağlanacaktır [26]. W_1, W_2, W_3 üç adet bom yapısının öz ağırlıklarıdır. L_0 , "EF" uzunluğundaki birinci bom yapısının uzunluğunu, L_1 , "CD" uzunluğundaki ikinci bom yapısının uzunluğunu, L_2 , "AB" uzunluğundaki üçüncü bom yapısının uzunluğunu ifade etmektedir. F noktasına maksimum 2 kg ağırlık yüklenecek şekilde yük hesaplamaları yapılıp, gerilme değerlerine göre sistem güvenlik faktörü hesaplanacaktır. Hesaplanan mesnet kuvvet değerleri, teleskobik mekanizmanın tahrik motoru seçim hesaplamalarına girdi olarak sağlanacaktır.



Şekil 5.13: Teleskobik Mekanizma Kesme Kuvveti Diyagramı

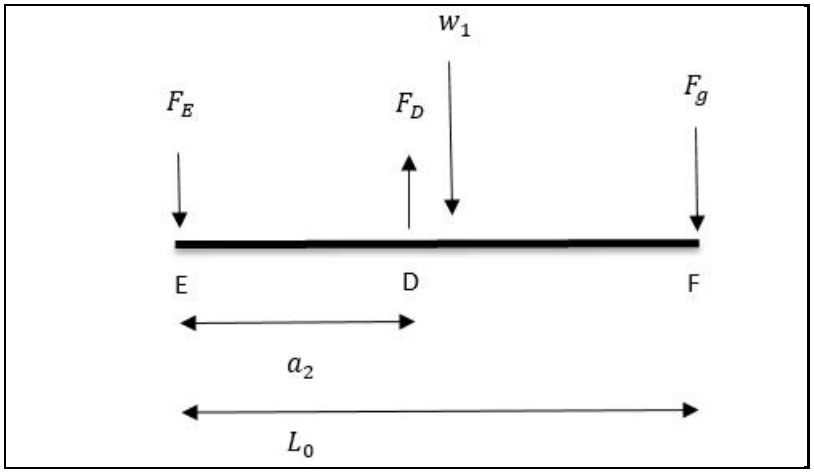


Şekil 5.14: Teleskobik Mekanizma Yandan Görünüş Teknik Resmi



Şekil 5.15: Teleskobik Mekanizma Önden Görünüş Teknik Resmi

5.2.1 Birinci bom yapısının kuvvet, moment, gerilme hesaplamaları



Şekil 5.16: Birinci Bom Yapısının Kesme Kuvveti Diyagramı

Şekil 5.16'da belirtilen kuvvet diyagramına göre D noktasındaki moment değeri denklem 5.1 kullanılarak hesaplanır.

$$M_D = F_E \times a_2 \quad \textbf{(5.1)}$$

Öz ağırlık değerleri denklem 5.2 kullanılarak hesaplanır.

$$w_1 = 5 \times 9{,}81 \ = 49{,}05 \text{ N}$$

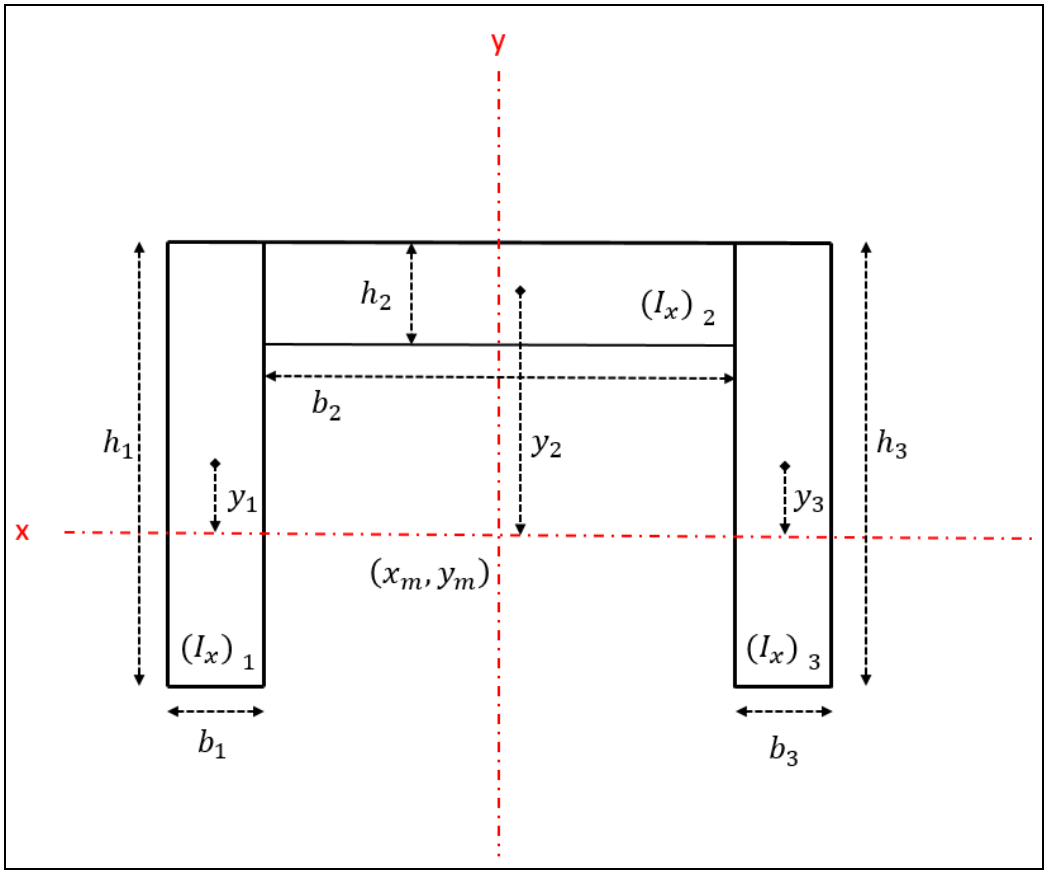
$$w_2 = 6 \times 9{,}81 = 58{,}86 \text{ N}$$

$$\sum M_D = 0 \quad \textbf{(5.3)}$$

$$F_E \times a_2 = W_1 \times \left(\frac{L_0}{2} - a_2\right) + F_g \times \frac{L_0}{2}$$

$$F_E \times 95 = 49{,}05 \times \left(\frac{352}{2} - 95\right) + 2 \times 9{,}81 \times \frac{352}{2}$$

$$F_E = 78{,}17\ N$$



Şekil 5.17: U kesitli Yapının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması

U kesitli bom yapısının ağırlık merkezi koordinatları aşağıdaki gibi belirlenir.

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times y_i}{\sum_{i=1}^{2} A_i} \qquad \textbf{(5.4)}$$

$$y_M = \frac{(1 \times 62) \times 31 + (1 \times 110) \times 61{,}5 + (1 \times 62) \times 31}{(1 \times 62) + (1 \times 110) + (1 \times 62)} = 45{,}33$$

$$x_M = 66$$

1,2 ve 3 alanlarının ağırlık merkezlerine göre atalet momentleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$y_1 = 45{,}33 - 31 = 14{,}33\ mm$$

$$y_2 = 45{,}33 - 61{,}5 = -16{,}17\ mm$$

$$y_3 = 45{,}33 - 31 = 14{,}33\ mm$$

$$I_x = (I_x)_1 + (I_x)_2 + (I_x)_3 \qquad \textbf{(5.5)}$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times h_1^3 + A_1 \times y_1^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_2 \times h_2^3 + A_2 \times y_2^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_3 \times h_3^3 + A_3 \times y_3^2\right)\right] \quad \textbf{(5.5a)}$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times 1 \times 62^3 + 1 \times 62 \times (14{,}33)^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 110 \times 1^3 + 110 \times 1 \times (-16{,}17)^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 1 \times 62^3 + 1 \times 62 \times (14{,}33)^2\right)\right]$$

$$I_x = 292607{,}84 \ \text{mm}^4$$

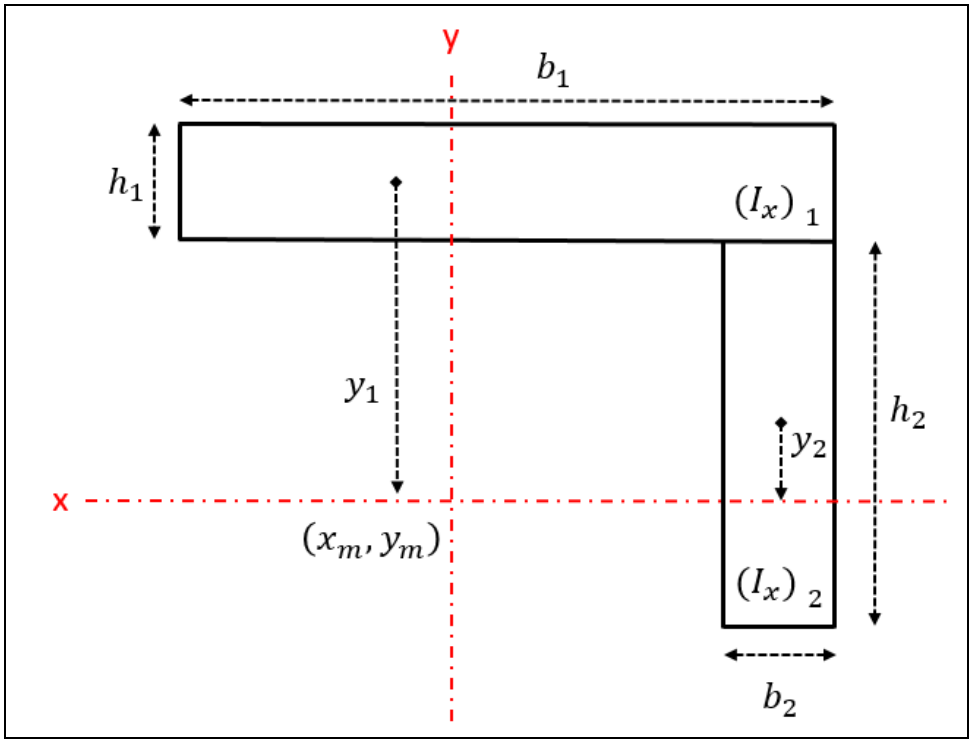
Bom yapısı üzerindeki D mesnetinde oluşan gerilme değeri denklem 5.7 kullanılarak hesaplanır.

$$W_0 = \frac{I_x}{y} \quad \textbf{(5.6)}$$

$$W_0 = \frac{292607{,}84}{45{,}33} = 6455{,}06 \ \text{mm}^3$$

$$\sigma_{D,1} = \frac{M_D}{W_0} \quad \textbf{(5.7)}$$

$$\sigma_{D,1} = \frac{78{,}17 \times 95}{6455{,}06} = 1{,}15 \ {}^{\text{N}}/_{\text{mm}^2}$$



Şekil 5.18: L Kesitli Yapının Atalet Moment Hesabı İçin Boyutlandırılması

5.4 numaralı denklem kullanılarak L kesitli yapının ağırlık merkezi hesaplamaları aşağıdaki gibi yapılır.

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times y_i}{A}$$

$$y_M = \frac{(8 \times 2) \times 19{,}5 + (2 \times 18{,}5) \times 9{,}25}{53} = 12{,}34 \text{ mm}$$

$$x_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times x_i}{A} \quad \textbf{(5.8)}$$

$$x_M = \frac{(8 \times 2) \times 4 + (2 \times 18{,}5) \times 7}{51} = 6{,}33 \text{ mm}$$

1 ve 2 alanlarının ağırlık merkezleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x_1 = x_M - x_1 \quad \textbf{(5.9)}$$

$$x_1 = 6{,}33 - 4 = 2{,}33$$

$$x_2 = x_M - x_1 \quad \textbf{(5.9a)}$$

$$x_2 = 6{,}33 - 7 = -0{,}67$$

$$y_1 = y_M - y_1 \quad \textbf{(5.10)}$$

$$y_1 = 12{,}34 - 19{,}5 = -7{,}16$$

$$y_2 = y_M - y_2 \quad \textbf{(5.10a)}$$

$$y_2 = 12{,}34 - 9{,}25 = 3{,}09$$

5.5a numaralı denklem kullanılarak x eksenindeki atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times h_1^3 + A_1 \times y_1^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_2 \times h_2^3 + A_2 \times y_2^2\right)\right]$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times 8 \times 2^3 + 16 \times 7{,}16^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 18{,}5^3 + 37 \times 3{,}09^2\right)\right]$$

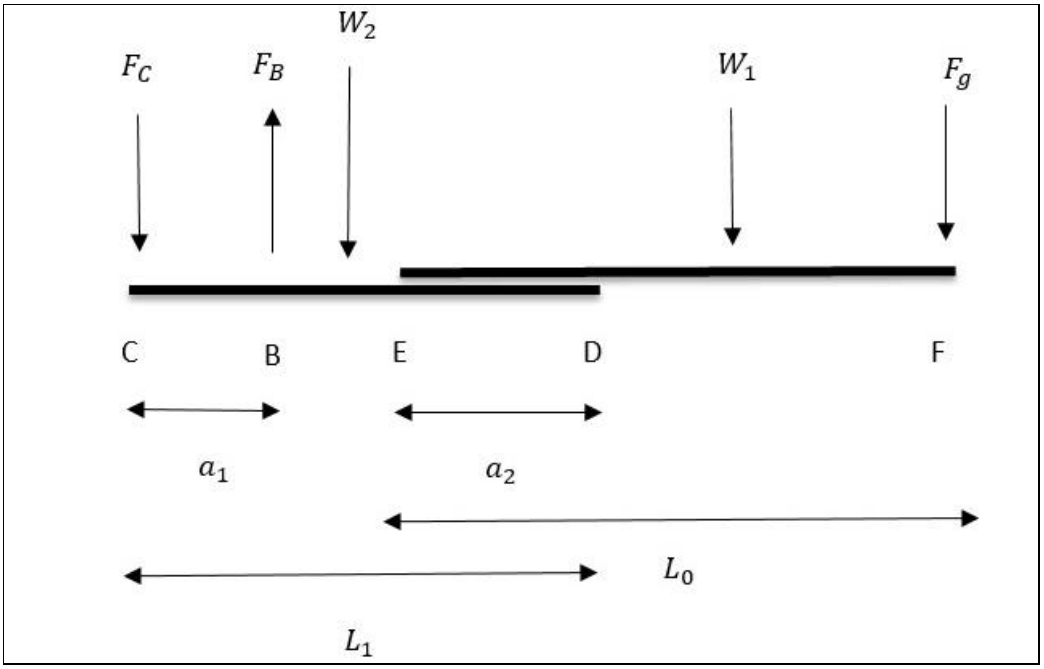
$$I_x = 7537{,}15 \text{ mm}^4$$

Birinci bom yapısı üzerinde bulunan D mesnetindeki kayar mekanizma taşıyıcı sac gerilme değeri 5.6 ve 5.7 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanır:

$$W_0 = \frac{I_x}{y} = \frac{7537{,}15}{12{,}34} = 610{,}79 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{D,1} = \frac{M_D}{W_0} = \frac{39{,}085 \times 95}{610{,}79} = 6{,}08 \ {}^{N}/_{mm^2}$$

5.2.2 İkinci bom yapısının kuvvet, moment, gerilme hesaplamaları



Şekil 5.19: İkinci Bom Yapısının Kesme Kuvveti Diyagramı

B noktasındaki moment değeri 5.1 numaralı denklem kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_B = F_C \times a_1$$

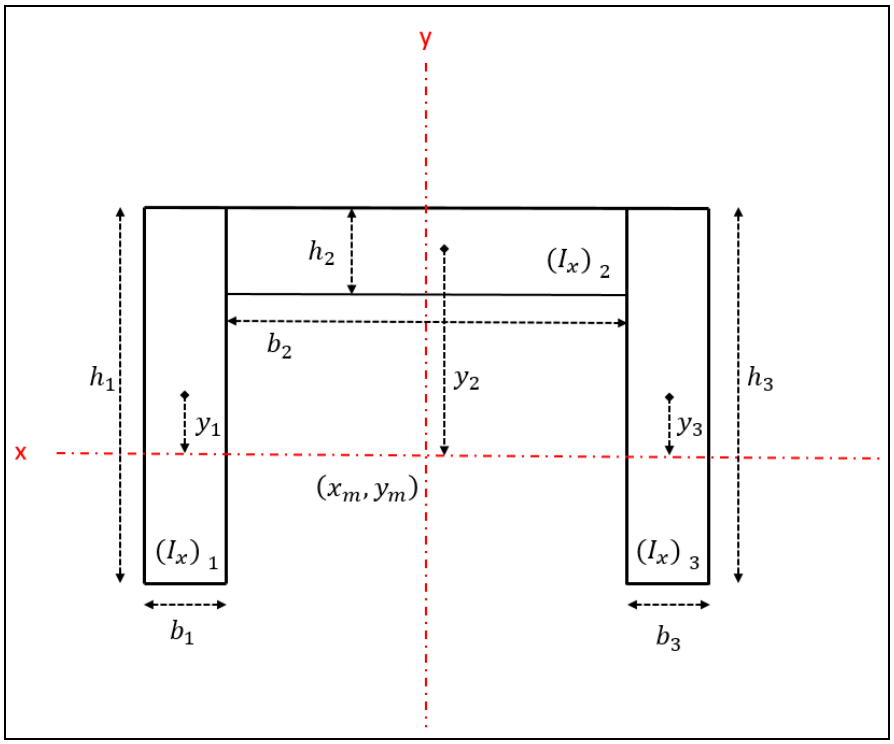
Moment denge denklemi kurularak C noktasındaki kuvvet değeri bulunur.

$$\sum M_B = 0 \qquad \textbf{(5.3a)}$$

$$F_C \times a_1 = W_2 \times \left(\frac{L_1}{2} - a_1\right) + W_1 \times \left(L_1 - a_1 + \frac{L_0}{2} - a_2\right) + F_g \times (L_0 + L_1 - a_1 - a_2)$$

$$F_C \times 125 = 58{,}86 \times \left(\frac{350}{2} - 125\right) + 49{,}05 \times \left(350 - 125 + \frac{352}{2} - 95\right) + 2 \times 9{,}81 \times (352 + 350 - 125 - 95)$$

$$F_C = 219{,}27\ N$$



Şekil 5.20: U kesitli İkinci Bom Yapısının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması

5.4 numaralı denklem kullanılarak ağırlık merkezinin koordinatları aşağıdaki gibi bulunur.

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times y_i}{\sum_{i=1}^{2} A_i}$$

$$y_M = \frac{(108 \times 2) \times 54 + (2 \times 132) \times 107 + (108 \times 2) \times 54}{(108 \times 2) + (2 \times 132) + (108 \times 2)} = 74{,}1$$

$$x_M = 68$$

1 ve 2 alanlarının ağırlık merkezleri koordinatları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$y_1 = 74{,}1 - 54 = -20{,}1 \text{ mm}$$

$$y_2 = 74{,}1 - 107 = -32{,}9 \text{ mm}$$

$$y_3 = 74{,}1 - 54 = -20{,}1 \text{ mm}$$

5.5a numaralı denklem kullanılarak x eksenindeki atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_x = (I_x)_1 + (I_x)_2 + (I_x)_3$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times h_1^3 + A_1 \times y_1^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_2 \times h_2^3 + A_2 \times y_2^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_3 \times h_3^3 + A_3 \times y_3^2\right)\right]$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times 2 \times 108^3 + 108 \times 2 \times (-20{,}1)^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 132 \times 2^3 + 2 \times 132 \times (-32{,}9)^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 108^3 + 108 \times 2 \times (-20{,}1)^2\right)\right]$$

$$I_x = 2980240{,}56\ \text{mm}^4$$

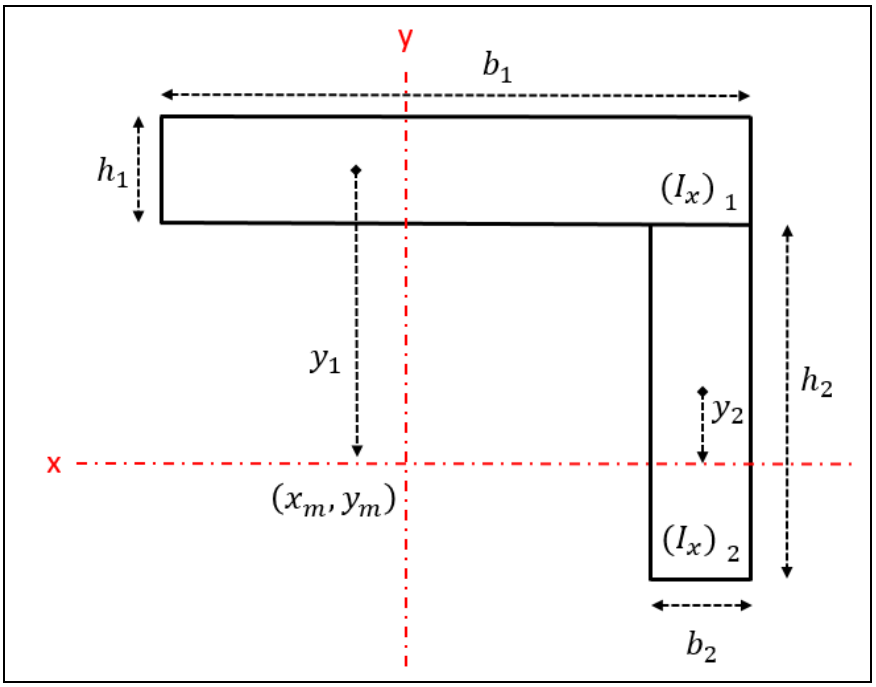
Bom üzerindeki B mesnetindeki gerilme değeri 5.6 ve 5.7 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$W_0 = \frac{I_x}{y}$$

$$W_0 = \frac{2980240{,}56}{74{,}1} = 40219{,}17\ \text{mm}^3$$

$$\sigma_{B,1} = \frac{M_B}{W_0}$$

$$\sigma_{B,1} = \frac{219{,}27 \times 125}{40219{,}17} = 0{,}68\ {}^{\text{N}}/_{\text{mm}^2}$$



Şekil 5.21: L kesitli İkinci Bom Yapısının Atalet Momenti Hesabı İçin Boyutlandırılması

M ağırlık merkezinin x ve y koordinatları 5.4 ve 5.8 denklemleri kullanılarak hesaplanır.

$$y_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times y_i}{A}$$

$$y_M = \frac{(8 \times 2) \times 19{,}5 + (2 \times 18{,}5) \times 9{,}25}{53} = 12{,}34 \text{ mm}$$

$$x_M = \frac{\sum_{i=1}^{2} A_i \times x_i}{A}$$

$$x_M = \frac{(8 \times 2) \times 4 + (2 \times 18{,}5) \times 7}{51} = 6{,}33 \text{ mm}$$

1 ve 2 alanlarının ağırlık merkezleri koordinatları 5.9, 5.9a, 5.10, 5.10a denklemleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x_1 = x_M - x_1$$

$$x_1 = 6{,}33 - 4 = 2{,}33$$

$$x_2 = x_M - x_1$$

$$x_2 = 6{,}33 - 7 = -0{,}67$$

$$y_1 = y_M - y_1$$

$$y_1 = 12{,}34 - 19{,}5 = -7{,}16$$

$$y_2 = y_M - y_2$$

$$y_2 = 12{,}34 - 9{,}25 = 3{,}09$$

5.5a numaralı denklem kullanılarak x eksenindeki atalet momenti aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times b_1 \times h_1^3 + A_1 \times y_1^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times b_2 \times h_2^3 + A_2 \times y_2^2\right)\right]$$

$$I_x = \left[\left(\frac{1}{2} \times 8 \times 2^3 + 16 \times 7{,}16^2\right) + \left(\frac{1}{2} \times 2 \times 18{,}5^3 + 37 \times 3{,}09^2\right)\right]$$

$$I_x = 7537{,}15 \text{ mm}^4$$

İkinci bom yapısı üzerinde bulunan B mesnetindeki kayar mekanizma taşıyıcı sac parçası üzerinde oluşan gerilme değeri 5.6 ve 5.7 numaralı denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$W_0 = \frac{I_x}{y}$$

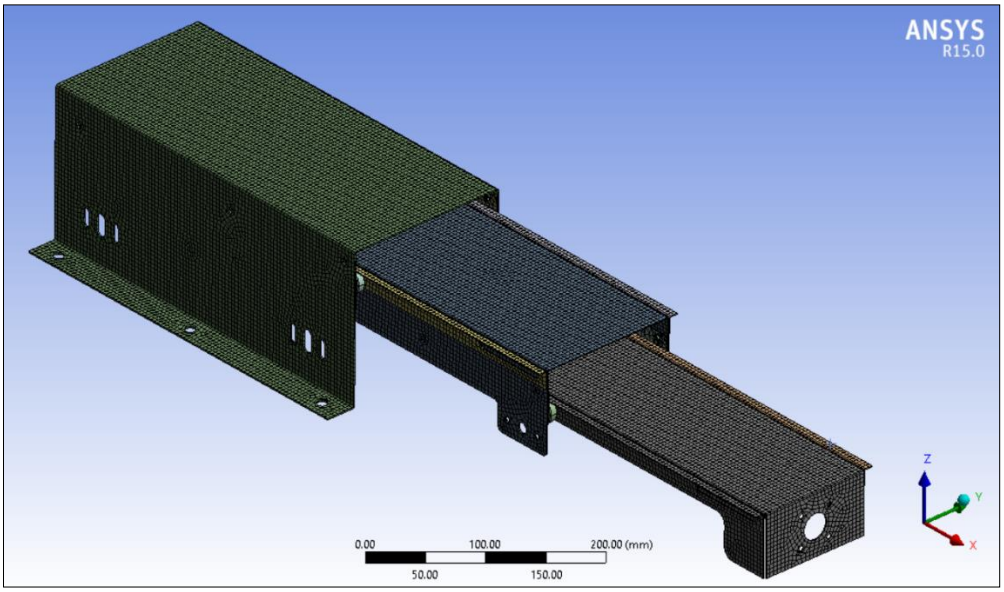
$$W_0 = \frac{7537{,}15}{12{,}34} = 610{,}79 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_{B,1} = \frac{M_B}{W_0}$$

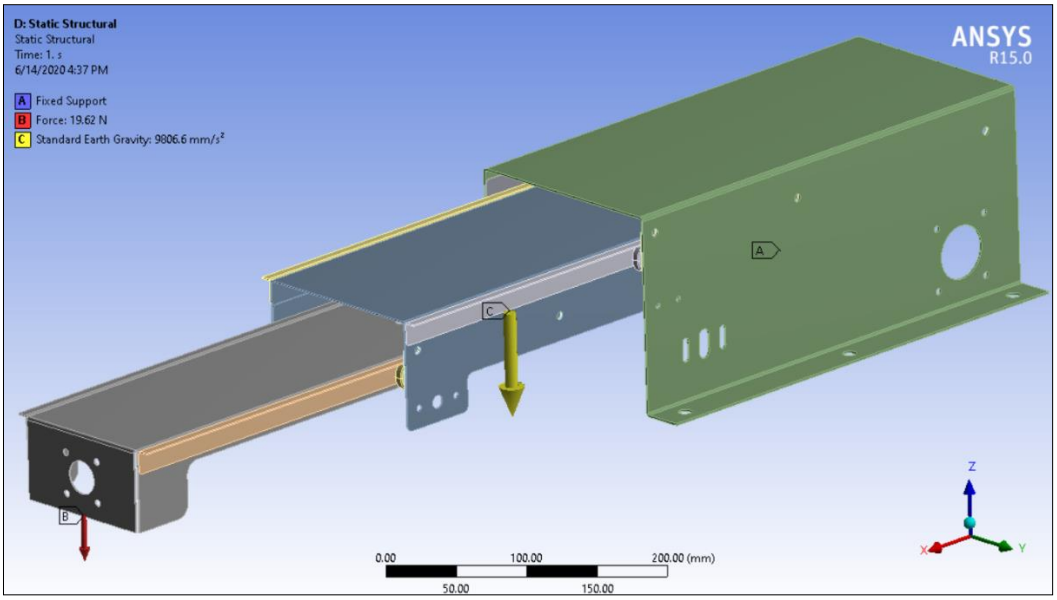
$$\sigma_{B,1} = \frac{M_B}{W_0} = \frac{109{,}635 \times 125}{610{,}79} = 22{,}43\ {}^{N}/_{mm^2}$$

5.3 Teleskobik Mekanizmanın Yapısal Analizi

Teleskobik mekanizmanın statik yapısal analizi "ANSYS-Static Structural" paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Baskın olarak Hexahedral tipli hesaplama ağı uygulanarak, 111025 düğüm noktası ve 54330 elemandan oluşan analiz modeli oluşturulmuştur.

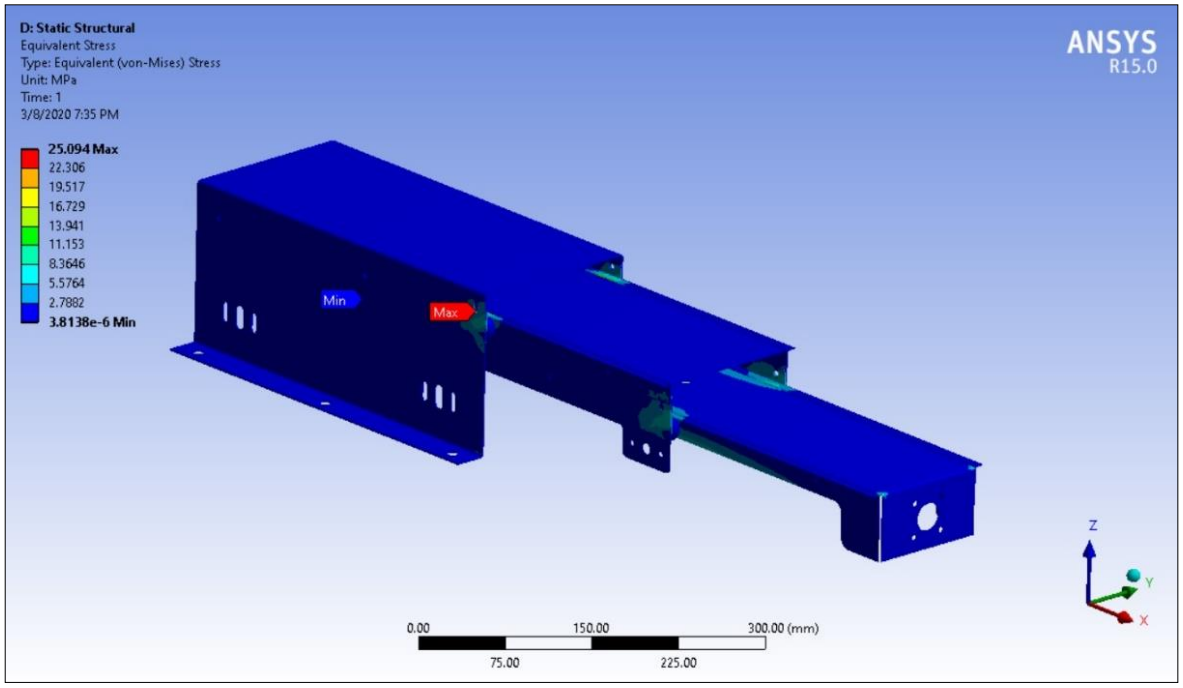


Şekil 5.22: Teleskobik Mekanizmanın Hesaplama Ağı Modeli



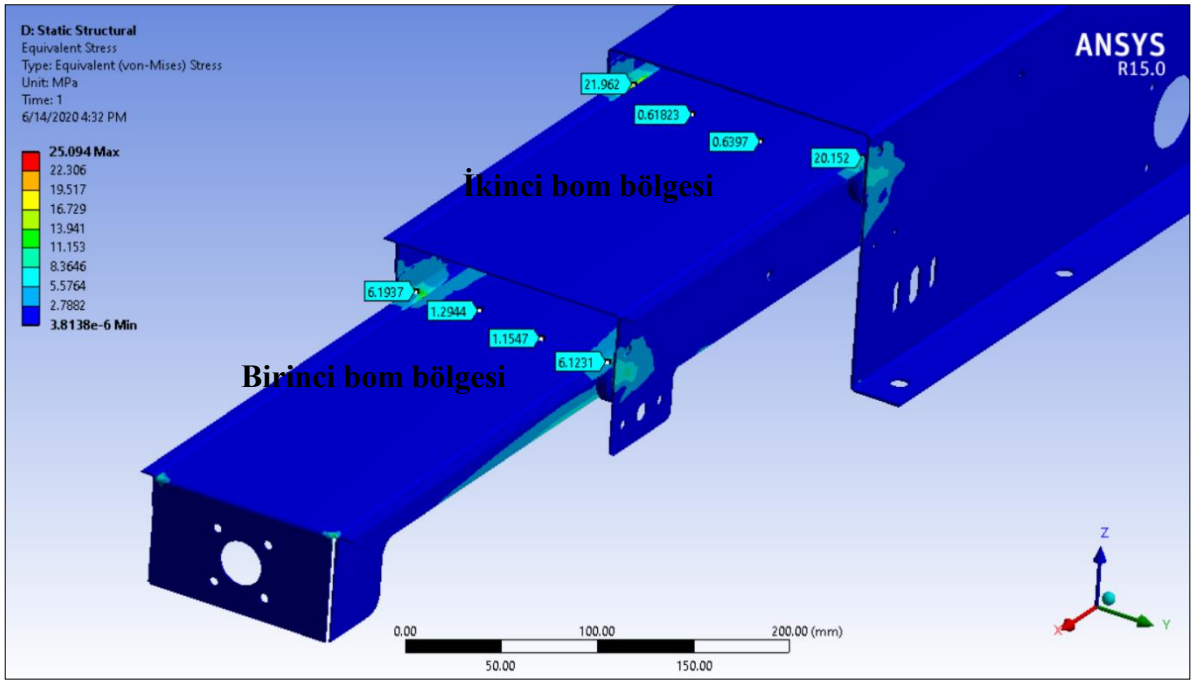
Şekil 5.23: Teleskobik Mekanizmanın Analiz Modeli Sınır Koşulları

Şekil 5.23'de görüldüğü üzere birinci bom yapısı üzerine B ile gösterilen noktadan 19,62 N kuvvet değeri –z yönünde uygulanmıştır. C ile gösterilen sistem ağırlık merkezinden –z yönünde yerçekimi kuvveti uygulanmıştır. A ile gösterilen nokta, 3. ve sabit olan bom yapısının alt yüzeyinin kaldırma sistemi üst plakası üzerine bağlandığı yere gösterir ve modelde "fix" olarak alınmıştır [27].



Şekil 5.24: Teleskobik Mekanizma Statik Yapısal Analiz Sonucu Maksimum Gerilme Dağılımı

Üçüncü sabit bom yapısı üzerinde, ikinci bom yapısı ile hareket ilişki içinde bulunan kayar mekanizma üzerindeki taşıyıcı sac parça üzerinde şekil 5.24'de görüldüğü üzere maksimum 25,094 MPa gerilme görülmüştür. ST52 çeliği malzemenin akma dayanımı 355 MPa olarak alınmıştır, güvenlik faktörü 14 olarak bulunmuştur.



Şekil 5.25: Teleskobik Mekanizma Statik Yapısal Analiz Sonucu Maksimum Gerilme Dağılımı

Çizelge 5.4: Analiz Sonuçları ve Analitik Hesaplama Karşılaştırma Tablosu

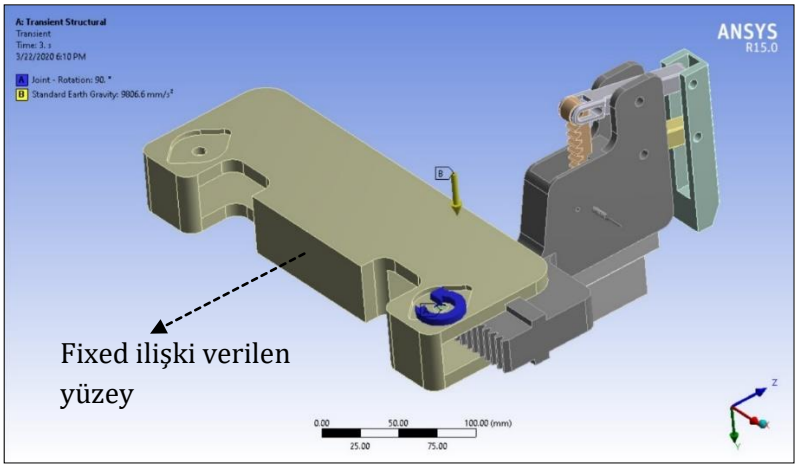
	Analiz MPa	Analitik Hesaplama MPa	Hata Payı %
Birinci bom bölgesi U kesitli sac	1,22	1,15	5,7
Birinci bom bölgesi L kesitli taşıyıcı sac	6,16	6,08	4,22
İkinci bom bölgesi U kesitli sac	0,62	0,68	9,6
İkinci bom bölgesi L kesitli taşıyıcı sac	21,06	22,43	6,5

Şekil 5.25'de kritik bölgelerde oluşan gerilme değerleri ölçülüp çizelge 5.4'de kayıt altına alınmıştır. Çizelge 5.4'de görüldüğü üzere analitik olarak hesaplanan gerilme değerleri ile yapısal analiz sonucu ölçümlenen gerilim değerleri arasında U kesitli ikinci bom bölgesi hariç % 0-3 mertebesinde sapma olduğu görülmüştür. Bu şekilde analiz ve analitik hesaplama yolu ile bulunan gerilim değerlerinin doğrulaması sağlanmıştır. U kesitli ikinci bom bölgesinde oluşan gerilme değerleri çok düşük mertebelerde olduğu için hata analizi dışında ele alınmıştır.

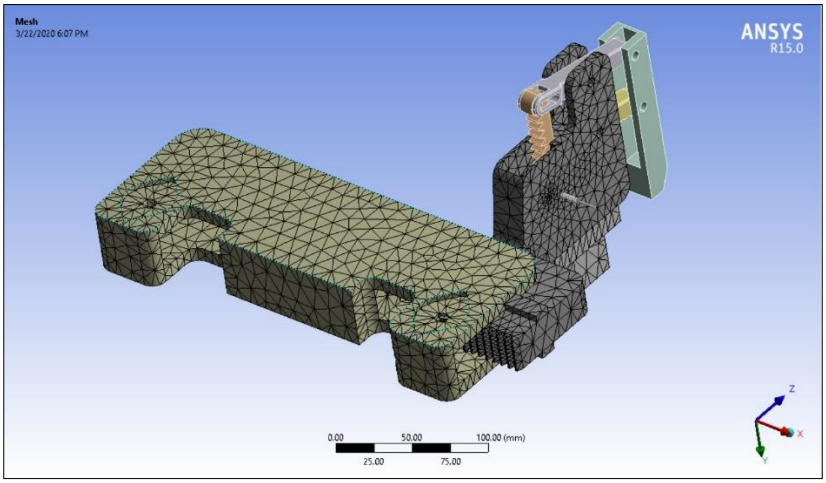
5.4 Paralel Çeneli Robotik Tutucu Tahrik Sisteminin Yapısal Analizi

Robotik tutucu sisteminde en yüksek tork değerinin uygulandığı kremayer dişli parçanın yapısal analizi gerçekleştirilerek dişlerde oluşan gerilme miktarları incelenmiştir. Şekil 5.26'da analiz modeli için uygulanan sınır koşulları görülmektedir. A ile gösterilen sınır koşulu bağlantı tipi y ekseninde dönme

serbestliğine sahiptir. Pinyon dişlinin gerçekleştirdiği açısal hareket, zamana bağlı olarak 0°, 30°, 60° ve 90° olacak şekilde girilmiştir. B ile gösterilen sınır koşulu y ekseninde uygulanan yerçekimi ivmesini belirtmektedir. Robotik tutucu sistemin teleskobik mekanizma ön bom yapısına bağlanan yüzeyi gerçek koşullarda olduğu gibi sabit (fixed) olarak ilişkilendirilmiştir.



Şekil 5.26: Robotik Tutucunun Analiz Modeli Sınır Koşulları



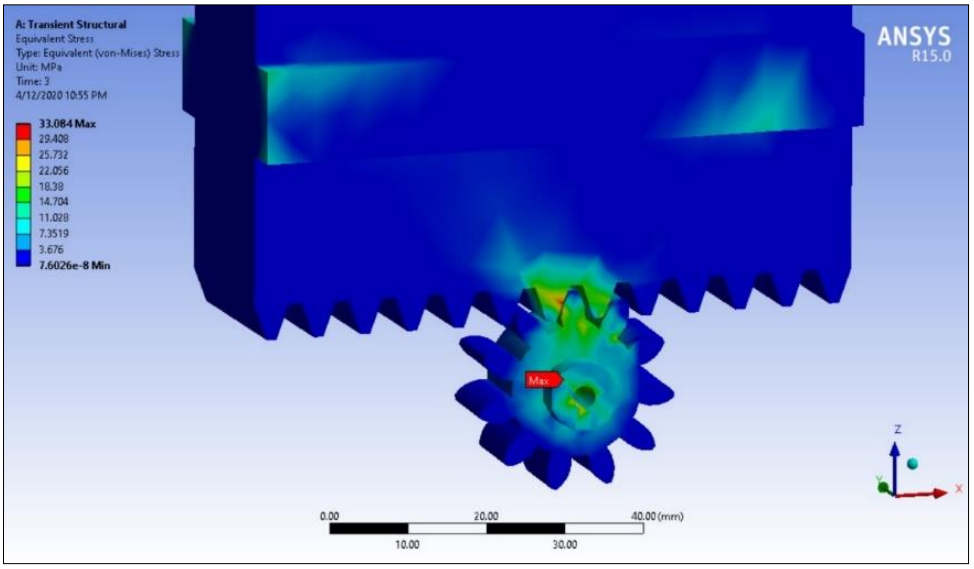
Şekil 5.27: Robotik Tutucunun Hesaplama Ağı Modeli

Şekil 5.27'de analiz hesaplama ağı modeli görülmektedir. Tetrahedral hesaplama ağ örgüsü oluşturulmuştur. Mesh modeli Çizelge 5.5'de görüldüğü üzere 49935 adet düğüm noktasına ve 24086 adet elemana sahiptir.

Çizelge 5.5: Hesaplama Ağı Modeli Özellikleri

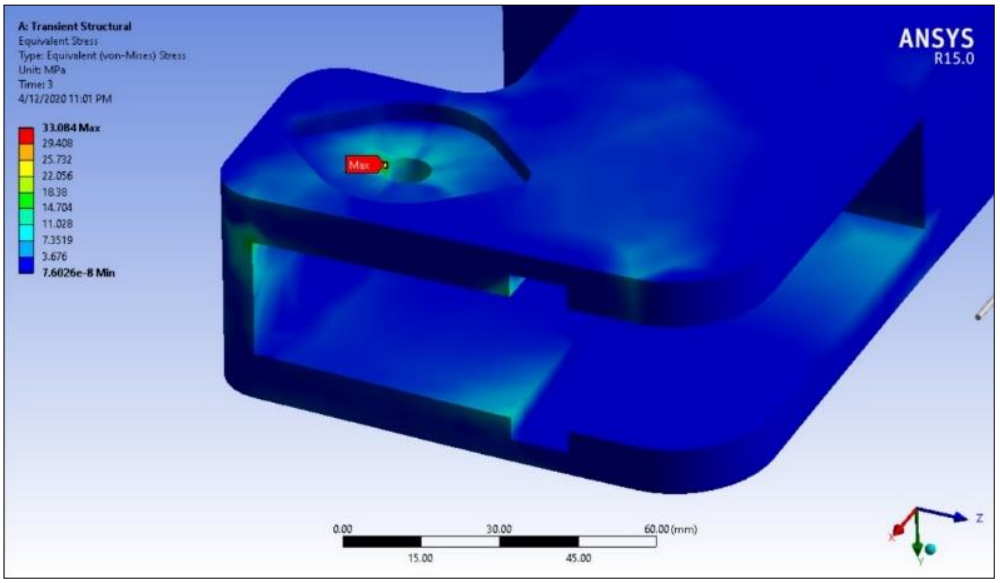
Düğüm Noktası	49935
Eleman	24086
Malzeme	PE
Hesaplama Ağı Tipi	Tetrahedral

Şekil 5.28'de kremayer dişli mekanizmasındaki maksimum gerilmenin oluştuğu bölge görülmektedir. Maksimum 33,084 MPa gerilme görülmektedir, malzeme olarak ABS plastik malzeme seçilmiştir. ABS plastik malzemesinin akma gerilmesi 40 MPa olarak alınmıştır [28]. Tasarımdaki güvenlik faktörü 1,2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.28: Kremayer Pinyon Dişli Yapısının Gerilme Dağılımı

Şekil 5.28'de kılavuzlama parçasında ve pinyon dişli motor mili bağlantı noktasında maksimum 33,084 MPa gerilme değeri oluştuğu görülmektedir. Şekil 5.29'da pinyon dişli yataklamasının yapıldığı bölgede de 33,084 Mpa maksimum gerilme değeri oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.29: Kılavuzlama Bölgesi Gerilme Dağılımı

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Mobil depo robotlarının çalışma ortamlarındaki değişiklikler mekanik gereksinimlerini de farklılaştırmaktadır. Mekanik olarak farklı fonksiyonel yaklaşımlar içeren tasarımlar ile depo yönetiminde optimum verim değerleri yakalanabilmektedir. Mobil robotun hareket kabiliyeti, çalışılmak istenen eksen üzerinde tasarlanacak mekanizmalar sayesinde gerçekleştirilebilmektedir. Bu tezde ilgili mekanizmaların hareket problemlerinin çözümlenmesi için gerekli statik ve dinamik formülasyonlar ve analiz programları vasıtası ile kinematik çözümlemeleri yapılmıştır. Aynı zamanda mobil robotun hareket denklemlerinin kontrol teorisi ile matematiksel modellemesi gerçekleştirilerek robotik sistemin mekatronik sistem tasarımı için gerekli mekanizma çözümlemeleri yapılmıştır. Mobil robotun mekanik katı model tasarım süreçleri "SOLIDWORKS" paket programı ile statik analiz süreçleri "ANSYS-Static Structural" paket programı vasıtasıyla yürütülmüştür. Kontrol yazılımı ve matematiksel modellemesi "MATLAB-Simulink" paket programı yardımıyla oluşturulmuştur.

Mekanik şasi alt sistemi tasarımında, şasi üzerindeki mekanizmaları taşıyabilecek bir platform tasarlanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda yere paralel olarak gerçekleştirilen motor mekanik bağlantı şekli ile robotun mekanik yüksekliğinden tasarruf sağlanmıştır. Mekanik şasi tekerlek konfigürasyonu, bağımsız motorlar ile sürülebilen iki adet tekerlek ve iki adet tahrik edilmeyen tekerlekler ile sağlanmıştır. Sistemi dengede tutabilecek minimum sayıda tekerlek ve tahrik motoru ile tasarım gerçekleştirilmiştir. Diferansiyel tipli tekerlek mekanizmasının matematiksel modeli oluşturulmuştur. Mobil robotun hareket kabiliyeti oluşturulan matematiksel modele bağlı olarak çalışan hareket simülasyonu ile test edilmiştir.

Makaslı kaldırma alt sistemi tasarımında iki tip makas tasarımı çalışılmıştır. İlk tasarım 3mm kalınlığa sahip ST52 standardına uyun DKP saç malzemeden üretilen parçalarla oluşturulan tasarımdır, mekanik montajı pul, cıvata ve somun bağlantı elemanları kullanarak gerçekleştirilmiştir. 8 adet parçadan parçasından oluşmaktadır. İkinci tasarım 1 mm et kalınlığına sahip ST52 standardına uygun çelik malzemeden

üretilmiş 20×20 profildir. 8 adet parçadan oluşur, mekanik montajı profil üzerine kaynak edilmiş burçların cıvata ve somun aracılığıyla yataklaması sonucu gerçekleştirilmiştir. Analitik olarak makaslı kaldırma mekanizmasının kaldıracağı yük (l) ve vidalı mil somun mekanizmasının bu yük değerini kaldırabilmesi için gerekli eksenel kuvvet değeri ve tork miktarı hesaplanmıştır. Hesaplanan tork değerine uygun seçilen step motor ile gerçekleştirilen prototip tasarım, kaldırma fonksiyonu testlerinde başarılı olmuştur. Oluşturulan analitik hesaplama modeli kullanılarak farklı yüksekliklerde çalışabilen makaslı kaldırma sistemleri tasarlanabilir. Gerçekleştirilen sayısal analizlerde sınır koşulu olarak analitik modelde hesaplanan eksenel kuvvet değerleri ve yük değerleri uygulanmıştır. İki farklı tasarımın analiz sonucu elde edilen maksimum gerilme değerleri, imal edildikleri malzemelerin akma dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarına göre profil tipli ikinci makas sistemi tasarımında maksimum 316,45 MPa eşdeğer gerilme görülmüştür. Analiz sonuçlarına göre sac tipli birinci makas sistemi tasarımında maksimum 639,391 MPa eşdeğer gerilme görülmüştür. Geliştirilmiş profil tipli ikinci tasarım için elde edilen maksimum gerilme değerleri imal edildiği malzeme akma dayanımı 355 MPa değerinin aşağısında olduğu görülmüştür. Profil tipli ikinci makas sistemi tasarımının sac tipli birinci makas tasarımına göre daha mukavemetli olduğu görülmüştür. İleride yapılacak çalışmalarda makaslı kaldırma sisteminin çalışması istenen yükseklik ve ağırlık değerlerine göre ilgili bölümde açıklanan analitik hesaplamalar ve analiz modelleri kullanılarak optimum tasarımlar gerçekleştirilebilir.

Teleskobik mekanizma alt sistemi tasarımı, mekanik şasi üzerinde açık ve kapalı konumlarda kaplayabileceği yer kısıtı göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Pnömatik veya elektrik kontrollü silindir eyleyiciler ile istenilen uzaklığa gidebilmek için farklı tasarım modelleri düşünülmüştür. Pnömatik silindir uygulamasının gerçekleştirilmesi için sabit bir hava hattının bulunması gereklidir. Hava sağlama sisteminin robot üzerine entegrasyonu yapıldığı durumda sisteme ek ağırlık getirerek, toplam robot ağırlık değerini arttırmaktadır. Teleskobik mekanizmanın maksimum açık olduğu pozisyon değerini sağlayabilen pnömatik ve elektrikli pistonlar, teleskobik mekanizmanın sağladığı minimum uzunluk değerlerinin üstünde kalmaktadır. Elektrikli silindir uygulamasında istenilen açık boy ölçüsü için seçilecek olan eyleyicinin, robot üzerine gerçekleştirilecek olan uygulamasında

toplam robot ağırlığını arttıracağı öngörülmüştür. Bu sebeplerden ötürü teleskobik mekanizma uygulaması gerçekleştirilmiştir. Teleskobik mekanizmaların, diğer eyleyicilere göre kapalı durumda daha az yer kapladığı ve açık olduğu durumda ise maksimum uzunluk ölçüsünü sağladığı görülmüştür. Teleskobik mekanizma tercih edilmesinin bir diğer sebebi de sağladığı açık ve kapalı konumdaki ölçü avantajıdır. Teleskobik mekanizma, birinci bom yapısına mekanik olarak bağlı ve beraber hareket eden robotik tutucu mekanizması ile hedef nesneyi istenilen uzaklık değerlerinde kavrama işlemi gerçekleştirerek ürün tepsisi üzerine alır. Tek eksende açılıp kapanma hareketi yapabilmektedir. Bir adet step motor kullanılarak üretilen dönme moment değeri triger kayışları ile bom yapılarına iletilmektedir. Bir adet eyleyici kullanımı, daha basit kontrol modelleri ile kontrol edilebilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda alternatif eyleyicilerin sağladığı eşdeğer robot fonksiyonlarını üretilebilmesine imkan verir. Teleskobik mekanizmanın birinci bom yapısı üzerine etkiyen robotik tutucu sistem ağırlık kuvveti ve taşınacak nesne ağırlık kuvveti, mekanizmayı eğmeye zorlar. Analitik hesaplamalar için toplam ağırlık kuvveti değeri uygulanarak, üç adet bom yapısı için moment, kuvvet ve kesme kuvveti diyagramları oluşturulmuştur. Analitik analiz yönteminde kesme kuvvetleri ve atalet momentlerinin kritik bölgelerde oluşturduğu gerilme değerleri hesaplanmıştır. Sayısal analiz bölümünde “ANSYS-Static structural” paket programı kullanılarak mekanizmanın maksimum açık olduğu konumda analitik modelde hesaplanan maksimum kuvvet değerleri uygulanarak bom yapılarının ve beraber çalıştığı bölgelerin gerilme dağılımları statik yapısal analizleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde ikinci bom bölgesinde L kesitli saç üzerinde analitik olarak hesaplanan maksimum gerilme değeri 22,43 MPa‘dır aynı bölgede analiz sonucu hesaplanan gerilme değerleri 21,06 MPa’dır analitik hesaplama ile bulunan değerler ve sayısal analiz ile bulunan sonuçlar arasında yaklaşık % 4,22-9,6 hata olduğu gözlemlenmiştir. Çizelge 5.4’de karşılaştırmalı olarak analitik hesaplama ve sayısal analiz yöntemleri ile elde edilen gerilme değerleri görülmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda ilgili bölümde açıklanan analitik hesaplama metotları ve analiz modelleri kullanılarak farklı minimum ve maksimum açılma değerlerine sahip ve farklı yükler taşıyabilen teleskobik mekanizmalar tasarlanabilir.

Kontrol alt sistem tasarımında geliştirilen yazılım ile enkoderden ve mesafe sensöründen gerçek zamanlı olarak toplanan veriler vasıtasıyla robota temel hareket fonksiyonlarının yaptırılması hedeflenmiştir. “MATLAB-Simulink” paket yazılımı kullanılarak sol ve sağ tekerlekler için açısal hız ve konum kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Robotun düz bir hat üzerindeki hareketi ve dönüş hareketi tekerlek millerine bağlı bulunan enkoder yardımı ile kontrol edilmiştir. Simülasyon sonuçları göz önüne alındığında oluşturulan matematiksel modelin hatasız çalıştığı görülmüştür. Hareket simülasyonunda kontrolü gerçekleştirilen mobil robotun açısal hız, doğrusal hız ve kontrol edilen mesafe parametrelerinin değişimi incelenmiştir. Hareket esnasında bu parametrelerin birbirleri olan ilişkileri analiz edilmiştir. Hareket simülasyonu bölümünde anlatıldığı üzere robotun kendi etrafında ideal dönüş hareketini gerçekleştirdiği senaryoda aynı zaman diliminde açısal hız parametresinin -1 ve 1 değerinde olduğu, robot ekseninde dönüş hareketi gerçekleştirdiği için kat edilen mesafe miktarının değişmediği buna bağlı olarak doğrusal hız parametresinin 0 olduğu gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucu öngörülen kabullerin sağlandığı görülüp, hareket kontrol sisteminin ve matematiksel modelin doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Mobil robotun prototip uygulamasındaki hareket testlerinde, tekerlerde oluşan kayma miktarları, mekanik montaj esnasında oluşabilen montaj kaçıklıkları ve parça üretim toleransları sebebi ile düz hat üzerindeki hareketinde sapmalar görülmüştür. Bu problem tezde gerçekleştirilen kontrol çalışmasının, IMU sensörleri ve PID algoritmaları kullanılarak geliştirilmesi ile giderilebilir. İleriki çalışmalarda bu tezde yapılan kontrol sistem yazılımı tasarımı çalışmaları kullanılarak otonomi seviyesi arttırılmış robot kontrolleri sağlanabilir, oluşturulan simülasyon modeline girdi sağlayarak prototip geliştirmeden gerçekleştirilmesi öngörülen robot hareketleri simülasyon üzerinden incelenebilir.

Paralel çeneli robotik tutucu alt sistemi bölümünde mobil depo robotunun düzgün geometrili ürünleri kavrayabilme fonksiyonunu gerçekleştirebilecek iki farklı robotik tutucu sistem tasarımı yapılmıştır. Robotik tutucu sistem için istenilen eksenlerdeki doğrusal hareketler kremayer dişli ve pinyon dişlisi mekanizmaları ile sağlanmıştır. Oluşturulan doğrusal kuvvetler ya doğrudan sürtünme etkisi ile ürünü kavramak için veya mafsallı bağlantı yapıları üzerinden istenilen doğrultuya aktarılarak istenilen kavrama işlemlerinin yaptırılması hedeflenmiştir. Birinci tasarımda 4 adet servo motor ile pinyon dişlileri tahrik edilmiştir. Motor ile oluşturulan dönme momentleri

kremayer dişliye aktarılmıştır. Bu şekilde kremayer dişlide oluşturulan doğrusal kuvvet çene-1 parçasına iletilerek ürünü sıkıştırarak kavramak için kullanılmıştır. Diğer iki adet servo motor tahriki ile oluşturulan dairesel hareket kremayer dişliye aktarılarak doğrusal hareket elde edilmiştir. Uzuv-1 ve uzuv-2 parçaları yardımı ile x ekseninde oluşturulan doğrusal hareket Çene-2 parçasına iletilerek x ekseninde hareket ederek nesneyi kavrama işlemi gerçekleştirir. Kavranan nesne teleskobik mekanizmanın –x yönündeki hareketi yardımıyla ürün tepsisi üzerine çekilir. Kutuyu kavramak için gerekli kuvvet ve tork değeri analitik olarak hesaplanmış olup 22,29 Nmm'dir. İkinci tasarımda 4 adet servo motor ile pinyon dişlileri tahrik edilmiştir. Motor ile oluşturulan dönme momenti kremayer dişliye aktarılarak doğrusal hareket elde edilmiştir. Kılavuz parça içerisinde yataklanmış şekilde oluşturulan doğrusal kuvvet çene-1 parçasına iletilerek ürünü sıkıştırarak kavramak için kullanılmıştır. Diğer iki adet servo motor tahriki ile oluşturulan dairesel hareket kremayer dişliye aktarılarak doğrusal hareket elde edilmiştir. Uzuv-1 ve uzuv-2 parçalarının yardımı ile z ekseninde oluşturulan doğrusal hareket çene-2 parçasına iletilerek -z ekseninde hareket elde edilmiştir. Z ekseninde oluşturulan bu kuvvet kavranmak istenilen ürünü arka yüzeyine teğet olacak şekilde kavrayarak, teleskopik mekanizmanın –x yönünde gerçekleştirdiği hareket yardımıyla hedef nesnenin ürün tepsisi üzerine çekilmesini sağlar. Kutuyu kavramak için gerekli tork değeri analitik olarak hesaplanmış olup 24,09 Nmm'dir. Birinci robotik tutucu sistem tasarımı şekil 3.28 ve şekil 3.29'da görüldüğü üzere maksimum 194 mm genişlik, 123 mm en ve 226 mm yükseklik ölçülerde kutuları kavrayabilmektedir. İkinci robotik tutucu sistem tasarımı şekil 3.34 ve şekil 3.35'de görüldüğü üzere maksimum 194 mm genişlik, 414 mm en 188 mm yükseklik ölçülerindeki kutuları kavrayabilmektedir. İkinci tasarım birinci tasarıma göre yaklaşık 3,5 kat daha fazla uzunluktaki kutuları kavrayabilmektedir. Bu özelliği sebebiyle ikinci tasarım tercih edilerek prototip uygulaması gerçekleştirilmiştir. "ANSYS-Static Structural" paket yazılımı ile gerçekleştirilen statik yapısal analizlerde kılavuz parçası üzerinde çalışan pinyon kremayer dişli çiftinin diş bölgelerinde oluşan eşdeğer gerilme değerleri incelenmiştir. Diş bölgesinde maksimum 33,084 MPa eşdeğer gerilme değeri görülmüştür. Robotik tutucu sisteminin imal edildiği ABS plastik malzemenin akma dayanımı 40 MPa olarak alınmış olup görülen gerilme değeri ve malzeme akma dayanım değeri değerlendirildiğinde tasarımın 1,2 güvenlik faktörüne sahip olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] **Liu X, Cao J**, (2018) "CPS-Based Smart Warehouse for Industry 4.0: A Survey of The Underlying Technologies", MDPI, Vol.4, 2-17.

[2] **Cosma C, Confente M, Governo M, Fiorini P,** (2004) "An Autonomous Robot for Indoor Light Logistics", International Conferences on Intelligent Robots and Systems.

[3] **Di Paola D, Naso D, Milella A, Cicirelli G, Distante A,** (2008) "Multi-Sensor Surveillance of Indoor Environments by an Autonomous Mobile Robot", 2008 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice.

[7] **Chuan L. P, Johari A, Wahab M. H. A, Nor D. M, Taujuddin N. S. A. M, Ayob M. E,** (2007) "An RFID Warehouse Robot", 2007 International Conference on Intelligent and Advanced Systems.

[8] **Bogue R,** (2016), "Growth in e commerce boosts innovation in the warehouse robot market", Industrial Robot: An International Journal, Vol.43.

[12] **X.Q. Chen, Y.Q. Chen, and J.G. Chase,** (2009) "Mobile Robots-Past Present and Future", DOI: 10.5772/6986

[13] **Chuan L. P, Johari A, Wahab M. H. A, Nor D. M, Taujuddin N. S. A. M, Ayob M. E,** (2007) "An RFID Warehouse Robot", 2007 International Conference on

[16] **Lior E, Daniel Frank P, Randolph Charles P,** (2015) "Autonomous order fullfilment and inventory control robots" United States Patent, Patent Number: US9540171B2

[17] **Amir Ali Forough N,** (2007). Concept of intelligent mechanical design for autonomous mobile robots. Kyushu Institute of Technology, Master Thessis, Japan.

[18] **Kristof G,** (2014). Autonomous mobile Robot Mechanical Design, Thessis, Brussel

[19] **Abraham, J.** (2010). Estimating deflection and stress in a telescopic cantiveler beam using the tip reaction model, PHD. Interim report, School of Engineering and Design, Brunel University, november.

[20] **Sabde Abhijit M, Prof. Jamgekar R.S,** (2016) "Analysis & Optimization of Hydraulic Scissor Lift", International Journal of Engineering Development and Research, Vol.4, 2321-9939

[21] **Samir R, Bahavesh P,** (2016) "A Review On Grasping Principle and Robotic Grippers", International Journal of Engineering Development and Research, Vol.4 (1) , 483-490.

[22] **Krishnamoorthy K.,** (2019). Design and Development Of A Lead Screw Gripper For Robotic Application, An International Journa Mechatroj, 2 (1) , 1-12.

[23] **Kaamesh, Kothandaraman,** (2016). Motion Planning and Control of Differential Drive Robot. Wright State University, Master Thessis, USA.

[24] **Cherry M, Nu Nu W,** (2016) "Position and Velocity control for two-wheel differential drive mobile robot", International journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Vol.5, 2278-7798

[25] **J. Abraham, D. W. A. Rees and S. Sivaloganathan,** (2011) "The Telescopic Cantilever Beam: Part 2 –Stress Analysis", Engineering Integrity, Vol.31, 1365-4101

[26] **Abraham, J.** (2010). Estimating deflection and stress in a telescopic cantiveler beam using the tip reaction model, PHD. Interim report, School of Engineering and Design, Brunel University, november.

[27] **Ana P, Cristiano F, Giangiacomo M,** (2017) "Buckling Analysis of Telescopic Boom: Theoretical and Numerical Verification of Sliding Pads", DOI: 10.17559/TV-20160510143822

[28] **Galeja M, Hejna A, Kosmela P, Kulawik A,** (2020) "Static and Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed ABS as a Function of Raster Angle", DOI:10,3390/ma13020297

İnternet Kaynakları

[4] **Url-1:** https://industryeurope.com/greyorange-expands-its-global-footprint/,GreyOrange Expands Its Global Footprint With New US Headquarters, erişim tarihi: 01.02.2020

[5] **Url-2:** https://www.linde-mh.com/en/Products/Automated-Trucks/L-Matic/,Pallet Lifter,erişim tarihi: 01.01.2020

[6] **Url-3:** https://fetchrobotics.com/products-technology/datasurvey/tagsurveyor/,Product Features, erişim tarihi: 01.03.2020

[9] **Url-4:** http://news.mit.edu/2017/drones-relay-rfid-signals-inventory-control-0825, Drones relay RFID signals for inventory control, erişim tarihi: 01.02.2020

[10] **Url-5:** http://roboturka.com/otomotiv/agv-otomatik-yonlendirmeli-araclar/,erişim tarihi: 01.04.2020

[11] **Url-6:** https://www.westfaliausa.com/products/automated-storage-retrieval-systems, Automated Storage & Retrieval Systems Gallery,erişim tarihi: 01.04.2020

[14] **Url-7:** https://www.inviarobotics.com/ ,Rootics-as-a-Service, erişim tarihi: 12.01.2020

[15] **Url-8:** https://www.inviarobotics.com/ ,Our System,erişim tarihi: 08.11.2019

ÖZGEÇMİŞ

Adı : Can
Soyadı : ÖZBARAN
E-mail : canozbaran@hotmail.com

Eğitim Bilgileri

Derece	Üniversite	Bölüm	Mezuniyet Yılı
Lisans	İstanbul Teknik Üniversitesi	Makine Mühendisliği	2015

İş Deneyimi

Görevi	Kurum	Süre
Proje Mühendisi	Krea Teknik Müh. Hiz. San. Ve Tic. A.Ş.	2015-2016
Kontrol Mühendisi	TMMOB	2016-2017
ARGE Mühendisi	Novosim Müh. Hiz. San. Ve Tic. A.Ş.	2017-2019
Test Mühendisi	Kale Araştırma ve Geliştirme A.Ş.	2019-