

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**CBS TABANLI OTONOM BURGU ROBOTU PROTOTİPİNİN
GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Osman ECEOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EKİM 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**CBS TABANLI OTONOM BURGU ROBOTU PROTOTİPİNİN
GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA**

Osman ECEOĞLU

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFI BİLGİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EKİM 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

CBS TABANLI OTONOM BURGU ROBOTU PROTOTİPİNİN
GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Osman ECEOĞLU

UZAKTAN ALGILAMA VE COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 11/10/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. İlker ÜNAL (Danışman)

Doç. Dr. Önder KABAŞ

Doç. Dr. İlker SÖNMEZ

Doç. Dr. Bayram KILIÇ

Doç. Dr. Bekir AKSOY

ÖZET

CBS TABANLI OTONOM BURGU ROBOTU PROTOTİPİNİN GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Osman ECEOĞLU

Doktora Tezi, Uzaktan Algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İlker ÜNAL

Ekim 2024; 115 sayfa

Bu çalışmada, meyve bahçelerinde dikim çukurlarının açılmasını otonom olarak gerçekleştirebilen, CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) tabanlı otonom bir burgu robotu geliştirilmiştir. Tarımsal mobil robot, diferansiyel yönlendirme sistemi ve sabit hedef pozisyonlara ilerleyebilme yeteneği ile donatılmış, dört tekerlekli ve holonomik olmayan bir yapıya sahiptir. Tasarlanan mobil robot, tamamen otonom, yarı otonom veya tamamen manuel modlarda kullanılabilme özelliğine sahiptir. Redüktörlü DC motorla tahrik edilen y eksenli kaydırıcıdan oluşan çukur açma sistemi, 2.1 HP benzinli motora sahip bir burgu içermektedir.

Mobil robot ve çukur açma sisteminin tasarımı ve modellemesi, SOLIDWORKS 2020 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Robot navigasyon sistemi ve delme mekanizması yazılımının oluşturulmasında Microsoft Visual Basic.NET programlama dili kullanılmıştır.

Mobil robotun istenen noktaya yönlendirilmesinde, mevcut konumun hedefe olan mesafesi ile heading ve azimut açıları kullanılmaktadır. hedef nokta için herhangi bir ortamdan gönderilen koordinatlar, hedefin enlem ve boylam bilgilerini içermektedir. Robotun kendi koordinat verileri ve heading açısı değerleri ile belirlenen hedef noktanın koordinatları arasındaki matematiksel ilişkiye dayanarak yönlendirme işlemi yapılmaktadır. Robotun heading açısı, hedefin azimut açısı ve iki nokta arasındaki mesafe, endüstriyel bilgisayarda çalışan yazılım tarafından anlık olarak hesaplanmaktadır. Heading ve azimut açıları eşitlenene kadar robot, hedef noktaya doğru yönünü ayarlamaktadır. Geliştirilen yazılım, mobil robotun üzerine endüstriyel bilgisayarın yerleştirilmesine olanak tanımaktadır. Böylece, internet bağlantısı üzerinden robot uzaktan izlenebilmekte ve kontrol edilebilmektedir.

Gerçek ve istenen çukur konumları arasındaki mesafeleri belirleyen çapraz iz hatası (XTE), mobil robotun çukur açma noktalarına yönlendirme doğruluğunu analiz etmek için kullanılmıştır. Sonuç olarak mobil robotun konum hassasiyetinin aritmetik ortalaması 4.35 cm, standart sapması ise 1.73 cm olarak belirlenmiştir. Bu değerler, önerilen sistemin meyve bahçelerinde fide çukuru açılmasında etkili ve kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Literatürde, otonom çukur açma ile ilgili benzer bir çalışmaya rastlanmamış olup, bu çalışmanın tarımsal robotik alanına özgün bir katkı sunduğu düşünülmektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: CBS, GPS, Hassas tarım, Meyve bahçesi, Mobil robot, Navigasyon, Toprak burgu makinesi.

JÜRİ: Doç. Dr. İlker ÜNAL

Doç. Dr. Önder KABAŞ

Doç. Dr. İlker SÖNMEZ

Doç. Dr. Bayram KILIÇ

Doç. Dr. Bekir AKSOY



ABSTRACT

A RESEARCH ON THE DEVELOPMENT OF GIS-BASED AUTONOMOUS AUGER ROBOT PROTOTYPE

Osman ECEOĞLU

PhD Thesis in Remote Sensing and Geography Information Systems

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İlker ÜNAL

October 2024; 115 pages

In this study, a GIS (Geographic Information Systems)-based autonomous auger robot capable of autonomously digging planting holes in orchards was developed. The agricultural mobile robot is equipped with a differential steering system and has the ability to advance towards fixed target positions. It has a four-wheeled, non-holonomic structure. The designed mobile robot can be used in fully autonomous, semi-autonomous, or fully manual modes. The hole-digging system, driven by a DC motor with a gearbox, consists of a sliding mechanism along the y-axis and an auger powered by a 2.1 HP gasoline engine.

The design and modeling of the mobile robot and the hole-digging system were carried out using SOLIDWORKS 2020 software. Microsoft Visual Basic.NET programming language was used in the development of the robot's navigation system and drilling mechanism software.

To guide the mobile robot to the desired point, the distance between the current position and the target, along with the heading and azimuth angles, are utilized. The coordinates sent from any environment for the target point contain the latitude and longitude information of the target. The navigation process is carried out based on the mathematical relationship between the robot's own coordinate data, the heading angle values, and the coordinates of the determined target point. The robot's heading angle, the azimuth angle of the target, and the distance between the two points are calculated in real-time by the software running on an industrial computer. The robot adjusts its direction towards the target point until the heading and azimuth angles align. The developed software allows an industrial computer to be installed on the mobile robot. Thus, the robot can be monitored and controlled remotely via an internet connection.

The cross-track error (XTE), which determines the distances between the actual and desired hole positions, was used to analyze the accuracy of the mobile robot's navigation to the hole-digging points. As a result, the average positional accuracy of the mobile robot was determined to be 4.35 cm, with a standard deviation of 1.73 cm. These values demonstrate that the proposed system is effective and usable for digging seedling holes in orchards. No similar study related to autonomous hole-digging has been encountered in the literature, and it is believed that this study makes a unique contribution to the field of agricultural robotics.

KEYWORDS: GIS, GPS, Mobile robot, Navigation, Orchard, Precision agriculture, Soil auger machine.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. İlker ÜNAL

Assoc. Prof. Dr. Önder KABAŞ

Assoc. Prof. Dr. İlker SÖNMEZ

Assoc. Prof. Dr. Bayram KILIÇ

Assoc. Prof. Dr. Bekir AKSOY



ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, CBS tabanlı otonom burgu robotu prototipinin geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmış olup, tarım sektöründe mekanizasyonun etkinliğini artırmayı hedefleyen bir araştırma olarak tasarlanmıştır. Tarımsal üretimde verimliliğin artırılması ve iş gücü ihtiyacının azaltılması amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın, tarım robotları ve otonom sistemler alanında yapılan araştırmalara önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Doktora çalışmamın planlanması, araştırılması, yürütülmesi ve oluşumu sürecinde ilgi ve desteğini esirgemeyen; geniş bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, yönlendirmeleri ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller doğrultusunda şekillendiren değerli hocam Doç. Dr. İlker ÜNAL'a, tez izleme komitesi üyelerine, Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı öğretim üyesi hocalarıma ve bu süreçte bana desteğini esirgemeyen eşime ve oğullarıma en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	4
2.1. Mobil Robotlar	4
2.1.1. Mobil robot sürüş sistemleri	4
2.1.2. Holonomik mobil robot sistemi.....	9
2.1.3. Non-Holonomik mobil robot sistemi.....	10
2.1.4. Mobil robot kinematiği.....	11
2.1.5. Bahçe tarımında robotik uygulamalar	14
2.1.5.1. SWEEPER	15
2.1.5.2. LADYBIRD.....	16
2.1.5.3. BoniRob	17
2.1.5.4. Thorvald II	18
2.2. GPS (Global Positioning System)	19
2.2.1. GPS navigasyon mesajı	22
2.2.2. Bir noktaya ait konumun GPS ile hesaplanması.....	23
2.2.3. GPS alıcısı ve veri iletişim formatları	27
2.2.3.1. NMEA veri iletişim formatı.....	28
2.2.4. Coğrafi konum sistemleri	29
2.2.4.1. Universal transverse marcator (UTM).....	31
2.2.5. Navigasyon metodolojisi	31
2.3. Coğrafi bilgi sistemleri ve ArcGIS.....	33
2.3.1. Harita görüntülerini coğrafi referanslama ve sayısallaştırma.....	35
3. MATERYAL VE METOT	37
3.1. Materyal.....	37
3.1.1. Mobil robot tasarımı ve kinematik modeli	38

3.1.2. Mobil robot hareket sistemi	39
3.1.3. DC motor ve redüktör	41
3.1.4. Motor kontrol ünitesi	42
3.1.5. Toprak burgusu	45
3.1.6. Besleme ünitesi	46
3.1.7. Panel bilgisayar	50
3.1.8. GPS alıcısı	52
3.1.9. El kumandası	55
3.1.10. Elektronik pusula	55
3.1.11. Yazılım geliştirme ortamı	57
3.2. Metot	57
3.2.1. Yazılımsal çözümler	57
3.2.1.1. Motorların yerleşimi ve kontrol algoritması	58
3.2.1.2. GPS verilerinin işlenmesi ve navigasyon algoritması	60
3.2.1.3. Toprak burgusu kontrol algoritması	63
3.2.2. Mobil robot test işlemleri	65
3.2.2.1. Çukur açma işlemi için navigasyon iş dosyasının oluşturulması	65
3.2.2.2. XTE hata oranının belirlenmesi	67
3.2.3. Toprak burgusu ile çukur açma test işlemleri	68
3.2.3.1. Toprak burgusu ile çukur açma işleminde kullanılan deneme alanı	68
3.2.3.2. Çukur açma noktalarının doğruluğunun belirlenmesi	68
3.2.3.3. Çukur açma noktalarının haritalanması	69
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	71
4.1. Mobil Robot Test İşlemleri	71
4.1.1. Mobil robot teknik özellikleri	71
4.2. Toprak burgusu çukur açma işlemi	72
4.2.1. Çukur açma haritalarının oluşturulması	72
4.2.2. İş dosyası ile açılan çukurların karşılaştırmalı analizi	73
5. SONUÇLAR	83
6. KAYNAKLAR	84
7. EKLER	91
EK-1. Geliştirilen yazılımına ait kodlar	91

ÖZGEÇMİŞ



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “CBS Tabanlı Otonom Burgu Robotu Prototipinin Geliştirilmesi Üzerine Bir Araştırma” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

11/10/2024

Osman ECEOĞLU



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
°	: Derece
A	: Amper
Ah	: Ampere hour
A·s	: Akım saniye
c	: Işık hızı
°C	: Derece santigrat
cc	: Cubic centimeters
CF	: Korelasyon Faktörü
cm	: Santimetre
cm ³	: Santimetreküp
d	: Mesafe
da	: Dekar
g	: Gram
G	: Giga byte
GHz	: Gigahertz
HP	: Horse Power
Hz	: Hertz
r	: Yarıçap
τ	: Sinyal geçiş süresi
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
kW	: Kilowatt
L	: Litre

m : Metre
mm : Milimetre
ms :Mili saniye
Nm : Newton metre
ppm : Milyonda bir birim
rpm : Revolutions per minute
s : Saniye
W : Watt
V : Volt

Bu tezde kullanılan ondalık ayırıcı nokta (“.”)’dır.

Kısaltmalar

ABD : Amerika Birleşik Devletleri
AC : Alternating Current
ADC : Analog Digital Converter
AGM : Absorbent Glass Mat
AIS : Automatic Identification System
ASCII : American Standard Code for Information Interchange
B : Batı
C/A : Coarse/Acquisition
CAGR : Compound Annual Growth Rate
CAN :Controller Area Network
CBS : Coğrafi Bilgi Sistemleri
CDMA : Code Division Multiple Access
CE : Conformité Européenne
CKS : Coğrafi Konum Sistemleri
CORS : Continuously Operating Reference Station

D	: Doğu
D	: Dimensional
DC	: Direct Current
DGPS	: Differential Global Positioning System
DOF	: Degrees Of Freedom
DWT	: Double Wheel Transmission
EDGE	: Enhanced Data rates for GSM Evolution,
ESRI	: Environmental Systems Research Institute
G	: Güney
GIS	: Geographic Information System
GLONASS	: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema
GNSS	: Global Navigation Satellite System
GPRS	: General Packet Radio Service
GPS	: Global Positioning System
GSM	: Global System for Mobile Communications
HF	: High Frequency
IP	: Ingress Protection
IoT	: Internet of Things
ISO	: International Organization for Standardization
K	: Kuzey
LAN	: Local Area Network
LCD	: Liquid Crystal Display
LED	: Liquid Crystal Display
LIDAR	: Light Detection and Ranging
LPT	: Line Printer Terminal
LWD	: Logging While Drilling

MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NMEA	: National Marine Electronics Association
PPS	: Precision Positioning Service
PRN	: Pseudo Random Noise Code
PSR	: Pseudo Range
PWM	: Pulse Width Modulation
Q-Q	: Quantile-Quantile
RC	: Radio Control
RF	: Radio Frequency
RGB-D	: Red Green Blue – Depth
RS232	: Recommended Standard 232
RTCM	: Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	: Real Time Kinematic
SINS	: Strapdown Inertial Navigation System
SSD	: Solid State Disk
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protokol
TSE	: Türk Standardları Enstitüsü
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle
UHF	: Ultra High Frequency
USA	: The United States of America
USB	: Universal Serial Bus
UTC	: Universal Coordinated Time
UTM	: Universal Transverse Marcator
WD	: Wheel Drive
XTE	: Cross Track Error

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tekerlekli sürüş sistemine sahip mobil robot	5
Şekil 2.2. Paletli mobil robot	6
Şekil 2.3. Dört ayaklı robot; a) paletli modda; b) bacaklı modda.....	7
Şekil 2.4. Modüler hareket süspansiyon sistemi (Maroşan ve Constantin 2021).....	7
Şekil 2.5. Suda hareket edebilen minyatür yumuşak robot (Ng vd. 2021)	8
Şekil 2.6. Hava / yer çift modlu mobil robot prototipi (Zhang vd. 2021).....	9
Şekil 2.7. a) 3 tekerlekli holonomik robot; b) 4 tekerlekli holonomik robot (Moreno vd. 2016).....	10
Şekil 2.8. Non- Holonomik robot (Moreno vd. 2016)	11
Şekil 2.9. Çok yönlü bir mobil robotun kinematik modeli (German vd. 2023).....	12
Şekil 2.10. Diferansiyel bir robotun kinematik modeli (German vd. 2023).....	14
Şekil 2.11. SWEEPER prototipi (Arad vd. 2020).....	16
Şekil 2.12. Ladybird alana nokta püskürtme (Underwood vd. 2015).....	17
Şekil 2.13. BoniRob (Ramin Shamshiri vd. 2018)	18
Şekil 2.14. Thorvald II modüllerinden toplanan robotlara birkaç örnek.	19
Şekil 2.15. Dünya üzerinde 6 farklı yörüngede dönen 24 uydu.....	20
Şekil 2.16. GPS'in ana işlevi	21
Şekil 2.17. 2D konumun belirlenmesi.....	21
Şekil 2.18. Hassasiyeti dikey olarak arttırılmış 2D konum belirleme	22
Şekil 2.19. 3 boyutlu konum belirleme	22
Şekil 2.20. Taylor serilerinin dönüşümü.....	26
Şekil 2.21. GPS alıcısının blok şeması (Zogg 2002)	28
Şekil 2.22. Koordinat sistemleri için referans noktaları (Ünal 2012).....	30
Şekil 2.23. UTM koordinat sistemi (Ünal 2012)	31
Şekil 3.1. CBS tabanlı Otonom Toprak Burgu Robotunun a) katı modeli; b) fotoğrafı	38
Şekil 3.2. Mobil robot ve burgu sistemi blok şeması.....	39
Şekil 3.3. Mobil robotun teknik çizimi.	40
Şekil 3.4. Geliştirilen diferansiyel robotun kinematik modeli.....	40
Şekil 3.5. DC motor ve redüktör	42
Şekil 3.6. Roboteq FDC3260 marka motor kontrol ünitesi	42
Şekil 3.7. FDC3260 Motor kontrol ünitesi blok şeması motor ve güç bağlantıları	43

Şekil 3.8. Burgu sistemi	46
Şekil 3.9. Güç kaynağı	47
Şekil 3.10. Akü şarj cihazı	47
Şekil 3.11. İnvertör	49
Şekil 3.12. Lilliput PC-700 endüstriyel panel bilgisayar	51
Şekil 3.13. Endüstriyel bilgisayar bağlantı noktaları	51
Şekil 3.14. Promark 500 GPS alıcısı.....	53
Şekil 3.15. Promark 500 GPS alıcısının mobil robot üzerindeki yerleşimi	53
Şekil 3.16. Manuel kontrol için kullanılan el kumandasının robot üzerindeki konumu	55
Şekil 3.17. Elektronik pusula	56
Şekil 3.18. Pusulanın robot üzerindeki konumu	56
Şekil 3.19. Navigasyon yazılımı	58
Şekil 3.20. Çukur açma yazılımı.....	58
Şekil 3.21. Çeyrek daire kontrol mekanizmasının akış şeması (Ünal ve Topakci 2015).....	61
Şekil 3.22. Heading ve Azimuth açıları	62
Şekil 3.23. Mobil robot navigasyon yönteminin akış şeması	63
Şekil 3.24. Toprak burgu makinesinin ve H şeklindeki ızgaranın tam ölçekli teknik çizimi.	64
Şekil 3.25. Toprak burgusu akış şeması.....	65
Şekil 3.26. XTE hata ölçüm işlemi	68
Şekil 3.27. Otonom burgu robotu ile çukur açma noktalarının doğrulunun belirlenmesi	69
Şekil 3.28. CBS tabanlı Otonom Toprak Burgu Robotu için a) uydu görüntüsünün alınması; b) uydu görüntülerinin coğrafi referanslama işlemi; c) çukur noktalarının mobil robota yüklenmesi.....	70
Şekil 4.1. ArcMap ile oluşturulan harita.....	73
Şekil 4.2. Hedef konumlar ve mobil robotun çukur açtığı konumlar	74
Şekil 4.3. Çukur açma işlemi için çalışma alanındaki mobil robotun görüntüleri.....	74
Şekil 4.4. Açılan çukurların görüntüleri.	75
Şekil 4.5. Mobil robotun XTE değerlerinin histogramı.....	76
Şekil 4.6. XTE değerlerinin normal Q-Q grafiği	77
Şekil 4.7. XTE'nin mekânsal dağılımı	78

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Motor kontrol ünitesinin teknik özellikleri.....	43
Çizelge 3.2. Toprak burgu makinesinin teknik özellikleri.....	45
Çizelge 3.3. Akü şarj cihazı teknik özellikleri.....	48
Çizelge 3.4. İnvertör teknik özellikleri	49
Çizelge 3.5. Robot enerji tüketimi ve çalışma süresi hesaplama.....	50
Çizelge 3.6. Lilliput PC-700 endüstriyel bilgisayarın teknik özellikleri	52
Çizelge 3.7. Promark 500 GPS alıcısının teknik özellikleri	54
Çizelge 3.8. Honeywell HMR3000 elektronik pusulanın teknik özellikleri.....	57
Çizelge 3.9. Robot sistemi motor kontrol algoritması verileri.....	59
Çizelge 3.10. Burgu sistemi motor kontrol algoritması verileri	60
Çizelge 3.11. Mobil robotun gitmesi gereken noktalara ait örnek navigasyon verileri..	66
Çizelge 4.1. Ağaç türüne göre dikim yoğunluğu ve mesafeler.....	79

1. GİRİŞ

Dijital tarım, geleneksel işlemlerden sürekli otomatik işlemlere geçmek için, veri analizi, robotik ve sensörler gibi modern teknolojilerin uygulamasıdır. Dijital tarım ve sahaya özgü hassas yönetimlerin uygulanması ile modern çiftlikler kurulabilmektedir. Tarımsal alan robotları ve manipülatörleri, dijital tarım ve hassas tarımın farklı yönlerinin önemli bir parçası olmaya başlamıştır. Tarım robotlarındaki başarılı çalışmalardan bazıları: otonom yabancı ot kontrolü, tarla taraması, hasat için kullanılmaktadır. Çoklu robot kavramları, insan-robot iş birliği, hava görüntüleri ve yer tabanlı sensörlerden alınan veriler verimli çiftliklerin yaratılması için dijital tarımda önem arz etmektedir. Sürdürülebilir tarım, yeterli ve nitelikli miktarlarda gıda ürünlerinin uygun maliyetlerle üretilmesini, dünya tarımının ekonomik dinamizmini, çevrenin ve doğal tarım kaynaklarının korunmasını, dünya nüfusunun refahını artıracak sistem ve uygulamaları kapsamaktadır (Ramin Shamshiri vd. 2018).

Tarımsal üretim yapanlar 2050 yılında tahminen 9.8 milyar nüfusun talebini sürdürülebilir bir şekilde daha az topraktan daha fazla gıda üreterek karşılamaya zorluğu ile yüzleşeceklerdir (King 2017). Bu, her gün yeni 200.000 kişi eklenen bir şehri beslemeye eşdeğerdir. Çağdaş çiftliklerin, daha az iş gücüne ihtiyaç duyarak, düşük maliyetle ve yüksek verimlilikle sürdürülebilir tarım yapmaları hedeflenmektedir. Bu hedefe ulaşmada, sensörler kadar tarım robotlarının etkin kullanımı da büyük rol oynamaktadır. Dijital araçlar, sensörler ve kontrol sistemlerinin entegrasyonu, tarım robotlarının tasarım ve geliştirilmesini ilerletmekte, modern tarım için büyük faydalar ve potansiyeller sunmaktadır. Böylece, iş gücüne daha az bağımlı bir şekilde yüksek verim elde etmek mümkün olmaktadır.

Türkiye'de son yirmi yıl içinde meyve yetiştiriciliği yapılan alanlar artmış, daha büyük ve modern tekniklerle donatılmış bahçeler kurulmuştur. Meyve yetiştiriciliği sektörü hem kalite hem de miktar açısından önemli gelişmeler kaydetmiştir. Tarım arazilerinin genel azalışına rağmen meyvecilik alanları, toplam tarım arazileri içindeki payını artırmıştır. Modern tarım pratikleri, teknolojik yeniliklerin benimsenmesi ve çevre duyarlılığı artan bir biçimde öne çıkmaktadır. Yakın zamanda yapılan analizlere göre, tarım arazileri genelinde azalma görülse de meyve üretimi için ayrılan alanlar yaklaşık %25 oranda genişlemiştir.

Bir veya iki yıllık ağaç fidanlarının ana üretim alanlarına dikilmesi yoğun iş gücü gerektirmektedir. Bu süreçte; fidan çukurlarının açılması, fidanların bu çukurlara yerleştirilmesi, köklerin toprakla örtülmesi ve çevre toprağın bastırılarak nem kaybının azaltılması gibi işlemler bulunmaktadır. Bu işlemlerin zor ve zaman alıcı olması, fidan dikim ve çukur açma makinelerinin (toprak burgularının) geliştirilmesine neden olmuştur. Çukur açma makineleri, meyve ve orman ağaçları ile çit ve bağ direklerinin dikilmesinde kullanılmakta ve elle yapılan işlere göre iş hacmini büyük oranda azaltmaktadır (Barut 2005).

Teknolojik ilerlemeler ve otomasyonun artan entegrasyonu, pek çok bilimsel ve endüstriyel alanda devrim yaratmaktadır. Özellikle, CBS ve robotik sistemlerin kesişim noktasında, arazi yönetimi ve çevresel veri toplama işlemleri için yeni kapasiteler açığa çıkmaktadır. Bu çalışmada, CBS teknolojileri ile donatılmış yeni bir otonom burju robotunun geliştirilmesi ve bu robotun saha süreçlerine etkisi incelenmektedir. CBS'nin

zengin veri işleme ve analiz kabiliyetleri, bu robot prototipinin arazi şartlarında etkin bir şekilde çalışmasını sağlamak için stratejik olarak kullanılmaktadır.

Bu alanlarda yapılan geleneksel arazi çalışmaları, genellikle yüksek maliyetli ve zaman alıcıdır. Otonom robotlar, bu süreçleri daha hızlı, düşük maliyetli ve daha az insan müdahalesi ile gerçekleştirebilir bir yapı sunarak, saha çalışmalarını önemli ölçüde iyileştirebilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen prototip, CBS veri tabanlarından alınan bilgilerle donatılmış olarak, bu bilgileri anlamlandırarak ve buna göre hareket ederek saha koşullarında kendini yönlendirebilmektedir.

CBS tabanlı navigasyon ve veri toplama sistemi, robotun çevresel faktörleri algılamasını ve bu faktörlere göre optimal çukur açma noktalarını belirlemesini sağlamaktadır. Bu süreçte, robotun veri toplama ve işleme kapasitesi, saha çalışmalarından elde edilen verilerin doğruluğunu ve yararlılığını maksimize etmek için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, robot prototipinin geliştirilmesi süreci, ilgili alanlardaki literatürün kapsamlı bir analizini içermektedir. Bu analiz, daha önce geliştirilmiş sistemlerin limitasyonlarını ve bu prototipin üstlenebileceği potansiyel iyileştirmeleri belirlemekte kullanılmaktadır.

Tezin metodoloji bölümü, geliştirilen prototipin tasarımını ve inşasını detaylı bir şekilde anlatmakta ve bu süreçte kullanılan teknik özellikler ve bileşenler üzerinde durmaktadır. Ayrıca, robotun saha testleri sırasında karşılaştığı zorluklar, bu zorluklara karşı uygulanan çözümler ve test sonuçları da bu bölümde ele alınmaktadır. Bu testler, robotun performansını değerlendirmekte ve ileride yapılacak iyileştirmeler için temel oluşturmaktadır.

Bu tez çalışması, CBS tabanlı otonom robotlar kullanılarak saha verilerinin toplanması ve analiz edilmesi konusunda yeni bir perspektif sunmaktadır. Çalışma, bu tür sistemlerin etkinliklerini artırmak ve saha çalışmalarının gelecekte nasıl daha verimli hale getirilebileceği üzerine stratejik önerilerde bulunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, CBS ve robotik teknolojilerin entegrasyonunun alan çalışmalarını nasıl dönüştürebileceğini göstermekte ve bu alandaki ileri araştırmalar için bir referans noktası oluşturmaktadır.

Tarımsal faaliyetlerde kullanılan traktörler, biçerdöverler ve bu araçlara monte edilen ekipmanlar, tarlada yoğun bir trafik oluşturmaktadır. Bu tarla trafiği, özellikle traktör ve biçerdöverlerin artan ağırlıkları nedeniyle, dünya genelinde toprağın sıkışmasına neden olan en önemli faktörlerden biri haline gelmiştir.

Toprak sıkışıklığı, tarımsal üretimde ürün verimi ve kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biri olarak belirlenmiştir. Ayrıca, toprak işleme alet ve makinelerinin daha fazla enerji tüketimine neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, günümüz teknolojisini de göz önünde bulundurarak, burju sistemlerinin otonom olarak çalışan mobil robotlar üzerinde taşınması ve çukur açma işlemlerinin otomatik olarak gerçekleştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Bu proje kapsamında toprak sıkışıklığını azaltarak tarımsal üretimde ürün verimi ve kalitesini artırmayı amaçlayan noktadan noktaya otonom olarak hareket edebilen istenilirse bir joystick vasıtasıyla manuel olarak çalıştırılabilen bir mobil robot tasarlanmıştır. Geliştirilen sistem, otonom ve manuel olarak yönlendirilebilen bir mobil

robot üzerinden toprak burgusuna sahip olma konusunda hem Türkiye hem de Dünya literatüründe ilk olma özelliğine sahiptir.



2. KAYNAK TARAMASI

2.1. Mobil Robotlar

Mobil robotlar, genellikle tekerlekler veya paletler gibi hareket etmek için tasarlanmış mekanik ayaklara sahip robotlardır. Bu robotlar, zorlu ortamlarda navigasyon yapma, çeşitli görevleri otomatik olarak yerine getirme ve insanların erişemediği yerlere ulaşma yetenekleri ile dikkat çekmektedirler.

Araştırmacılar, mobil robotların karmaşık ortamlarda otonom olarak hareket edebilmesi için gelişmiş algılama ve navigasyon sistemlerinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Özellikle, dış mekân uygulamalarında, mobil robotların kötü hava koşullarına ve engebeli arazilere uyum sağlayabilmesi için yüksek düzeyde çevresel algılama yeteneklerine sahip olması gerektiği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, navigasyon, lokalizasyon, yol planlama ve haritalama gibi temel robotik görevlerin önemi büyüktür.

Mobil robotların Nesnelerin İnterneti (IoT) teknolojileri ile entegre edilmesi, bu robotların uzaktan izlenmesine ve kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu entegrasyon sayesinde, mobil robotlar daha geniş bir alanda ve daha esnek bir şekilde görev yapabilmekte, aynı zamanda gerektiğinde insan kontrolü altında çalışabilmektedir (Dawood Salman vd. 2020).

Hibrit mobil robotlar üzerine yapılan çalışmalar, bu robotların yürüme, uçuş ve yüzme gibi birden fazla hareket kabiliyetini birleştirdiğini göstermektedir. Araştırmacılar, bu çok yönlü hareket kabiliyetinin, robotların daha geniş bir alanı kapsamasını ve çeşitli görevleri daha etkin bir şekilde yerine getirmesini sağladığını belirtmişlerdir (Russo ve Ceccarelli 2020).

Robotların çevreleriyle olan etkileşimleri, mobil robotlar için özellikle önem arz etmektedir. Bu etkileşim, robotların çevrelerindeki değişikliklere uyum sağlamalarını, engellerden kaçınmalarını ve belirli görevleri yerine getirmelerini içermektedir. Araştırmalar, mobil robotların bu etkileşimi başarılı bir şekilde yönetebilmesi için gelişmiş algılama ve kontrol sistemlerine ihtiyaç duyduğunu göstermektedir (Jaulin 2019).

Yapay zekâ ve makine öğrenimi gibi teknolojilerin mobil robotlar alanına entegre edilmesiyle, bu robotların daha akıllı ve daha özerk hareket kabiliyetine sahip olacağı öngörülmektedir. Araştırmacılar, bu teknolojik ilerlemelerin mobil robotların daha geniş bir uygulama yelpazesinde etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanıyacağını ve böylece insan hayatının birçok alanında önemli gelişmelere yol açacağını belirtmektedirler (Burger vd. 2020).

2.1.1. Mobil robot sürüş sistemleri

Mobil robotların çeşitli sürüş sistemleri bulunmaktadır, bunlar robotların çeşitli ve zorlu ortamlarda etkin bir şekilde hareket edebilmeleri için gerekli teknolojik altyapıyı sağlayan mekanizmalardır.

Tekerlekli sistemler, en yaygın kullanılan mobil robot sürüş sistemlerinden birisidir. Genellikle diferansiyel tahrik veya ackermann direksiyonu gibi mekanizmalar kullanılarak tek veya çift taraflı tekerleklerle donatılmışlardır. Tekerlekli mobil robotlar için geliştirilen çift tekerlekli iletim (DWT) gibi yenilikçi sürüş mekanizmaları, iki ayrı motor tarafından bağımsız olarak tahrik edilen koaksiyel tekerleklerden oluşmakta ve üç serbestlik derecesine sahip olmaktadır. Bu yapı, robotun daha esnek hareket etmesini sağlamaktadır (Angeles 2003). Tekerlekli mobil robotların her bir tekerleği, mikroişlemci tabanlı sistemler kullanılarak ayrı ayrı kontrol edilebilmektedir. Mikroişlemci tabanlı sistemler, robotun hareket yörüngesinin daha hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlamaktadır (Kašík ve Pokorný 2000). Dört tekerleği bağımsız olarak tahrik edilen mobil robotlar, özellikle endüstriyel otomasyon ve dış mekân keşfi gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu robotlar için geliştirilen model tabanlı koordineli adaptif sağlam kontrolör, robotun dengesini ve izleme performansını teorik olarak garanti etmektedir (Liao vd. 2019). İç mekânlarda hizmet robotları için uygulanan modüler tümleşik tekerlek sistemleri, yüksek manevra kabiliyeti sunmakta ve robotların çeşitli yapılarını desteklemektedir ve robotların basit üç tekerlekli araçlardan tam holonomik hareket platformlarına kadar çeşitli yapılarına kolaylıkla entegre edilebilmektedir (Hanebeck vd. 1999).

Tekerlekli mobil robot sürüş sistemlerinin karmaşıklığı ve etkinliği üzerine yapılan çalışmada, Jatsun vd. (2024) tarafından özel sürüş modlarına sahip üç tekerlekli bir mobil robotik platformun dinamik özelliklerinin incelendiği belirtilmiştir. Bu platformların, yüksek manevra kabiliyetine, stabiliteye ve çeşitli zemin koşullarına uyum sağlama yeteneğine sahip olduğu bulunmuştur. Araştırmada, tekerlek düzenlemesi, tahrik mekanizması ve sensör entegrasyonunun, robotun çevresel algılama yetenekleri, engellerden kaçınma stratejileri ve genel navigasyon becerileri üzerinde önemli bir etkisi olduğu vurgulanmıştır. Bu bulgular, tekerlekli mobil robotların, iç mekân navigasyonundan arazi keşfine kadar geniş bir uygulama yelpazesinde etkili çözümler sunduğunu göstermektedir. Şekil 2.1’de iç mekân navigasyonu için uygun bir dört tekerlekli mobil robot resmi görülmektedir.



Şekil 2.1. Tekerlekli sürüş sistemine sahip mobil robot

Paletli sistemler, özellikle zorlu arazi koşullarında veya kaygan yüzeylerde kullanılmak üzere tasarlanmışlardır. Paletler, daha iyi çekiş ve stabilite sağlayarak engebeli arazilerde daha etkili hareket etmelerini sağlamaktadır. Paletli sürüş sistemlerinin, özellikle düzensiz ve yumuşak zeminler üzerinde hareket etme konusunda avantaj sağladığı belirtilmektedir. Araştırmacılar tarafından yapılan incelemeler, paletli sistemlerin büyük yer teması alanı sayesinde yumuşak zeminlerde üstün çekiş gücü sunduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, paletli sistemlerin hız ve enerji verimliliği açısından tekerlekli sistemlere göre bazı dezavantajlara sahip olduğu ortaya konmaktadır. Son dönemdeki çalışmalarda, bacak ve tekerleklerin bir araya getirildiği hibrit sistemlerin geliştirilmesine odaklanıldığı görülmektedir. Bu hibrit çözümler, paletli sistemlerin engel aşma kabiliyetini ve enerji verimliliğini artırma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir (Bruzzone vd. 2022). Şekil 2.2’de paletli mobil robot görülmektedir.



Şekil 2.2. Paletli mobil robot

Bacaklı sistemler, bazı hayvanların hareketini taklit eden robotlar için kullanılmaktadır. Birden fazla bağlantı ve eklemlerden oluşan bacaklar, robotun çeşitli zeminlerde tırmanma, merdiven çıkma ve engelleri aşma gibi görevleri başarmasını sağlamaktadırlar. Ancak, bacaklı sistemlerin karmaşıklığı ve maliyeti diğer sistemlere göre daha yüksektir (Holmes vd. 2006).

Çoklu temas noktalarını kullanarak zorlu arazilerde hareket edebilen bacaklı robotlar için, merkezsel dinamiklere dayalı genel bir şablon modeli önerilmiştir. Bu model, robotun kinematik sınırlamaları gibi tam model kısıtlamalarıyla başa çıkabilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, çevrimdışı öğrenme kullanılarak gerçekleştirilebilirlik kısıtlamalarını ele almak için genel bir prosedür sunulmuştur (Carpentier ve Mansard 2018). Kavramsız manipülasyon ve lokomasyon görevlerinin birleştirilmesi, bacaklı robotlar için karmaşık sistem hareket planlama ve kontrol sorunlarını doğurmuştur. Sunulan yaklaşım, operasyonel alanı küçültme ve faz düzleminde uygulanabilir yörüngeleri programlama yoluyla hareket planlama problemi çözülmüştür. Deney sonuçları, bu yaklaşımın etkinliğini doğrulamıştır (Zhang vd. 2020). Dışsal algıyı güçlü ve hızlı bir şekilde entegre eden bir lokomasyon kontrolörü, zorlu doğal ve kentsel ortamlarda test edilmiş ve yüksek bir sağlamlık ve hız sergilemiştir. Bu kontrolör, dikkat temelli tekrarlayan bir kodlayıcı kullanarak, farklı algı modlarını sorunsuz bir şekilde birleştirebilmeyi öğrenmiştir (Miki vd. 2022). Bu bulgular, bacaklı robotlar için lokomasyon sistemlerinin, özellikle zorlu ve değişken arazilerde etkili hareket edebilmesi için sürekli olarak geliştirilmekte olduğunu göstermektedir.

Hibrit mobil robot sürüş sistemlerinin, çeşitli hareket mekanizmalarının entegrasyonu ile robotların farklı zemin ve çevre koşullarında etkili bir biçimde hareket etmelerini mümkün kıldığı belirtilmiştir. Özellikle yumuşak, gevşek ve düzensiz arazilerde paletli lokomasyonun uygun olduğu, ancak tekerlekli lokomasyona kıyasla daha düşük hız ve enerji verimliliği sunduğu ifade edilmiştir. Bu bağlamda, operasyonel gereksinimlere göre en uygun mimariyi seçmeyi kolaylaştıran bacak ve tekerleklerle birleştirilmiş çeşitli hibrit çözümler tasarlandığı görülmüştür. Bu tür çözümler, hibrit mobil robot lokomasyon sistemlerinin gelişiminde önemli bir yer tutmaktadır (Bruzzone vd. 2022). Şekil 2.3'te TALBOT olarak adlandırılan paletli ve ayaklı bir hibrit robot görülmektedir.



Şekil 2.3. Dört ayaklı robot; a) paletli modda; b) bacaklı modda

Endüstriyel uygulamalarda modülerlik ve esnekliğin önemli bir yere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda, Marosan ve Constantin (2021) tarafından yapılan bir çalışmada, sanayi ortamlarının ihtiyaçlarına uyum sağlayabilecek şekilde yapılandırılabilen modüler bir sürüş sistemi tasarlandığı belirtilmiştir. Tasarlanan sistem Şekil 2.4'te görülmektedir. Bu sistem, farklı tekerlek türlerini içeren ve mobil platformların çeşitli konfigürasyonlarda yapılandırılmasına imkân tanıyan bir yaylı süspansiyon sistemine dayanmaktadır.



Şekil 2.4. Modüler hareket süspansiyon sistemi (Marosan ve Constantin 2021)

Titreşimle hareket eden robotların, mobil robotik alanında yeni bir yaklaşım olduğu gözlemlenmiştir. Korendiy vd. (2023) tarafından geliştirilen bir kontrol sistemi sayesinde, mobil titreşimle hareket eden bir robotun uzaktan kontrol edilebildiği ve bu robotun çeşitli boruların, tüplerin ve dar alanların iç yüzeylerini incelemek için kullanılabileceği belirlenmiştir.

Minyatür yumuşak robotların, dış uyarıcılara tepki veren akıllı malzemelerden yapıldığı ve mikro ile santimetre ölçeklerde dış uyarıcılardan güç alarak hareket edebildiği tespit edilmiştir. Ng vd. (2021) tarafından yapılan bir çalışma, bu tür robotların dar ve kapalı alanlara zararsız bir şekilde erişebildiğini ve minimal invaziv tıbbi tedaviler ile arama kurtarma görevleri gibi geniş bir uygulama yelpazesine sahip olabileceğini göstermektedir. Şekil 2.5'te düzgün manyetik bir alan tarafından tahrik edilen helikal kuyruklu bir minyatür robot görülmektedir.



Şekil 2.5. Suda hareket edebilen minyatür yumuşak robot (Ng vd. 2021)

Bazı mobil robotlar, su altı veya su yüzeyinde hareket etmek üzere özel olarak tasarlanmıştır. Bu tür robotlar genellikle pervane, jet motoru veya yüzme hareketi gerçekleştirebilen paletler gibi özel sürüş mekanizmalarına sahiptirler. Su altı veya su yüzeyinde hareket eden mobil robotlar üzerine yapılan çalışmalar, biyomimetik yaklaşımlar ve yüksek manevra kabiliyeti gibi özelliklerle dikkat çekmektedir.

Biyomimetik mobil su altı robotları balıklar gibi sucul canlıların hareketlerini taklit edecek şekilde tasarlanmıştır ve yüzgeç benzeri itiş sistemleri sayesinde yüksek manevra kabiliyetine sahiptirler. Su altında çıkma, batma ve çevik hareketler yapabilmek gibi karmaşık görevler gerçekleştirebilmektedir. Robotlar, uzaktan bir kontrol paneli aracılığıyla yönetilebilmekte ve ana kontrol ünitesi ile iletişim kurabilmektedir (Giergiel vd. 2014). Bir su altı kayar aracı ve robot balık tasarımının hibriti olan kayar robot balıklar, enerji verimliliği sağlayarak yüksek manevra kabiliyeti elde etmeyi amaçlamaktadır. Çevresel izleme gibi alanlarda kullanılmak üzere tasarlanmış bu robotlar, sucul ekosistemleri yüksek zaman ve mekân çözünürlüğü ile örnekleyebilmektedir (Zhang vd. 2014). Hava ve su altında hareket edebilme kabiliyetine sahip robotlar tasarlamak üzerine yapılan minyatür robotlar, sel sonrası su örneklemesi yapma veya su altı yapılarını inceleme gibi karmaşık görevler için robotlar geliştirmeyi hedeflemektedir. Bu robotlar, suya dalarken ve hava ile su arasında geçiş yaparken yüksek verimlilikle çalışabilen mekanizmalar kullanmaktadır (Siddall 2018). Balık ve yunus yüzme stilleri arasında geçiş yapabilen bu robotlar, düz yüzme, sağa/sola dönme, yukarı/aşağı yüzme ve yuvarlanma gibi çeşitli manevra kabiliyetlerine sahiptirler. Bu robotlar, basit bir yapıda olmalarına rağmen üç RC servo motor ile kontrol edilerek büyük bir manevra kabiliyeti sergileyebilmektedir (Ho ve Lee 2012).

Mobil robotların hava sürüş sistemleri, özellikle insansız hava araçları (UAV) ve diğer hava platformları kullanılarak gerçekleştirilen çeşitli uygulamalara imkân tanıyan teknolojilerdir. Hava sürüş sistemleri, karmaşık çevrelerde manevra yapabilmek, yüksek

düzeyde otomasyon ve gelişmiş algılama yetenekleri ile karakterize edilmektedir. “İkili Modlu Hava-Yer Mobil Robot” tasarımı adlı çalışmada hem hava hem de yer hareket kabiliyetine sahip çift modlu bir mobil robot tasarlanmıştır. Robot, uçuş modunda engebeli arazileri aşabilmekte ve yerde sürülerek enerji verimliliği sağlayabilmektedir. Prototip, bir UAV konfigürasyonu içermektedir ve bu prototipin hava-yer çift modlu hareket kabiliyeti ve hibrit lokomasyon verimliliği deneylerle doğrulanmıştır (Zhang vd. 2021). Şekil 2.6’da çift modlu bir mobil robot prototipi görünmektedir.



Şekil 2.6. Hava / yer çift modlu mobil robot prototipi (Zhang vd. 2021).

Mobil robotların seçilen sürüş sistemi, genellikle kullanılacak ortam ve görevlere bağlıdır. Her sistem kendi avantajları ve dezavantajlarına sahiptir ve doğru seçim, robotun verimliliği ve performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilmektedir.

2.1.2. Holonomik mobil robot sistemi

Hareketlilik türü, Holonomik veya Non- Holonomik olarak sınıflandırılabilir. Holonomik mobil robotlar, ara dönüş adımları yapmak zorunda kalmadan hareket yönünü değiştirebilme avantajına sahiptirler ve dönüş esnasında belirli bir başlangıç noktasından tüm yönlere hareket edebilirler (Moreno vd. 2016).

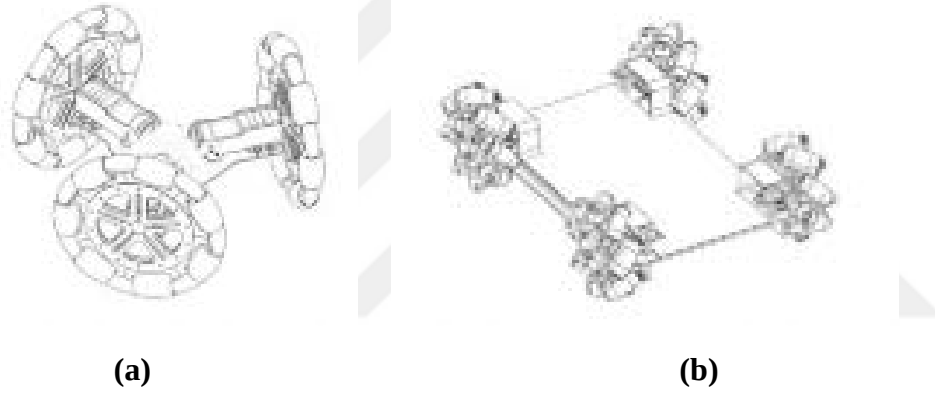
Bu robotlar, herhangi bir yönde hareket edebilme yeteneğine sahiptir ve bu, genellikle üç veya daha fazla bağımsız hareketli tekerlek veya palet ile sağlanmaktadır. Holonomik robotlar, dar alanlarda manevra yapabilme yetenekleri nedeniyle sıklıkla iç mekanlarda kullanılırlar. Bu tür robotlar, endüstriyel otomasyon, depo yönetimi, hastane lojistiği, temizlik robotları ve daha birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Örneğin, bir depoda malzeme taşıyan bir holonomik mobil robot, raf aralarında kolayca dolaşabilmekte ve hızlı bir şekilde hedef noktaya ulaşabilmektedir. Holonomik robotlar, karmaşık algoritmalar ve hassas sensörler kullanarak çevrelerini algılar ve hareketlerini optimize ederler. Bu sayede, dar alanlarda bile etkili bir şekilde hareket edebilirler.

Holonomik robot sistemleri, hareket kabiliyetleri açısından zenginlik sunar ve bu, onların karmaşık çevrelerde etkin bir şekilde manevra yapmalarını sağlamaktadır. Holonomik robot sistemleri, özellikle tarım gibi alanlarda, örneğin seralarda kullanıldığında, verimliliği ve hassasiyeti artırabilir. Tsiakas vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, seralarda holonomik mobil robotların otonom navigasyonu için kapsamlı bir mimari sunulmuştur. Bu yaklaşım, bitki sıraları boyunca navigasyon için ısıtma sistemi raylarını kullanır ve algı için tek bir stereo kamera ile doğru mesafe ölçümleri için bir LiDAR sensörü kullanır.

Yılan robotlar üzerine yapılan bir başka çalışma, planar yılan robotlarının sanal holonomik kısıtlamalar kullanılarak yol takibi kontrolünü ele almıştır. Bu çalışmada, yılan robotunun kinematik haritası belirlenmiş ve hareket denklemleri, karmaşık robotik yapılar üzerindeki anizotropik dış yıpratıcı kuvvetleri, örneğin yer çekimi kuvvetlerini, Euler-Lagrange hareket denklemlerine entegre etme yöntemi sunulmuştur (Rezapour vd. 2014).

Yol planlama algoritmaları üzerine yapılan genel bir araştırmada güvenli, verimli, çarpışmasız ve en düşük maliyetli seyahat yollarını belirlemek için kullanılan yol planlama algoritmaları ele alınmaktadır. Çalışma, optimal yol planlama algoritmasının seçiminin robot geometrisi, hesaplama kısıtları ve statik/holonomik veya dinamik/non-holonomik kısıtlı sistemler gibi çeşitli faktörlere bağlı olduğunu vurgulamaktadır (Karur vd. 2021) .

Şekil 2.7’de üç veya dört yöne hareket edebilen tekerleklerin kullanımına dayanan Holonomik robotlar görülmektedir.



Şekil 2.7. a) 3 tekerlekli holonomik robot; b) 4 tekerlekli holonomik robot (Moreno vd. 2016)

2.1.3. Non-Holonomik mobil robot sistemi

Non-holonomik mobil robot sistemleri, hareket kabiliyetleri üzerinde belirli kısıtlamaları olan robotlardır. Bu kısıtlamalar, robotun belirli bir yönde hareket etmesini engelleyebilir veya sınırlayabilir. Bir aracın tekerleklerinin yalnızca ileri ve geri yönlerde hareket edebilmesi, ancak yanlara doğru hareket edememesi bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Bu tür sistemler, karmaşık hareketler ve yol planlama stratejileri gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır.

Wada vd. (1995) tarafından geliştirilen bir çalışmada, non-holonomik tekerlekler kullanılarak omni-yönlü bir holonomik mobil robotun tasarımı ve kontrolü üzerine odaklanılmıştır. Bu çalışma, non-holonomik tekerleğin sürüş tekerleği olarak kullanıldığı bir mobil robotu tanıtmaktadır ve hem tek tekerlek hem de iki tekerlekli araç için bilgisayar simülasyonları ve tek tekerlekli deney sonuçları iyi performanslar göstermiştir.

Ma vd. (2013), non-holonomik mobil robot sistemlerinin gerçek zamanlı tanımlanmasına odaklanan bir çalışma sunmuştur. Bu çalışmada, robot tipinin önceden

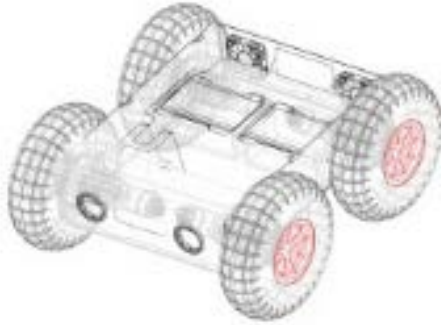
bilinmediği durumlar için non-holonomik mobil robot sistemleri, anahtarlanmış tekil doğrusal olmayan bir sistem olarak formüle edilmiştir ve sistemlerin ayırt edilebilirliği üzerine incelemeler yapılmıştır.

Perrier ve Dauchez (1998) tarafından yapılan bir başka çalışmada, tekerlekli bir araçta non-holonomik kısıtlamaların getirdiği zorlukların üstesinden gelmek için bir mobil manipülatör için uygulanabilir bir yolun belirlenmesine yönelik bir yöntem önerilmiştir.

Ravendran ve Hsu (2019), holonomik ve non-holonomik mobil robotlar üzerinde düşük maliyetli bir çarpışma önleme sisteminin karşılaştırmalı performansını sunmuşlardır. Bu çalışma, holonomik ve non-holonomik mobil platformlar arasındaki performans farklılıklarını değerlendirmekte ve geliştirilen mobil robotların çeşitli görev özellikleri için kullanılabileceğini göstermektedir.

Non-holonomik mobil robot sistemleri, kontrol teorisi, robotik ve otomatik kontrol sistemleri gibi alanlarda önemli bir araştırma konusudur. Bu sistemler, karmaşık hareket kabiliyetleri ve yol planlama stratejileri nedeniyle, tehlikeli ortamlarda görev yapma, otomatik malzeme taşıma ve fabrika içi lojistik gibi çeşitli uygulamalarda kullanıma potansiyeline sahiptir.

Şekil 2.8’de dört tekerlekli non-holonomik robot görülmektedir.



Şekil 2.8. Non- Holonomik robot (Moreno vd. 2016)

2.1.4. Mobil robot kinematiği

Mobil robot kinematiği, mobil robotların hareketlerini ve bu hareketlerin geometrik ilişkilerini derinlemesine inceleyen bir bilim dalıdır. Bu alan, robotun çeşitli konum ve yönelimlerdeki duruşunu nasıl değiştirebileceğini, özellikle de tekerlekler, paletler, bacaklar gibi çeşitli hareket mekanizmaları aracılığıyla, matematiksel olarak modellemeyi ve analiz etmeyi amaçlamaktadır. Bu, robotun pozisyonunu ve yönelimini değiştirmek için gerekli tekerlek hızlarının hesaplanmasından, robotun hareket kabiliyetlerinin ve kısıtlamalarının belirlenmesine ve robotun bir noktadan diğerine etkin bir şekilde nasıl hareket edebileceğinin planlanmasına kadar geniş bir yelpazede konuları kapsamaktadır.

Mobil robotların kinematik analizi, robotun çevresiyle nasıl etkileşime gireceğini ve belirli bir hedefe nasıl ulaşacağını anlamak için kritik öneme sahiptir. Bu analiz,

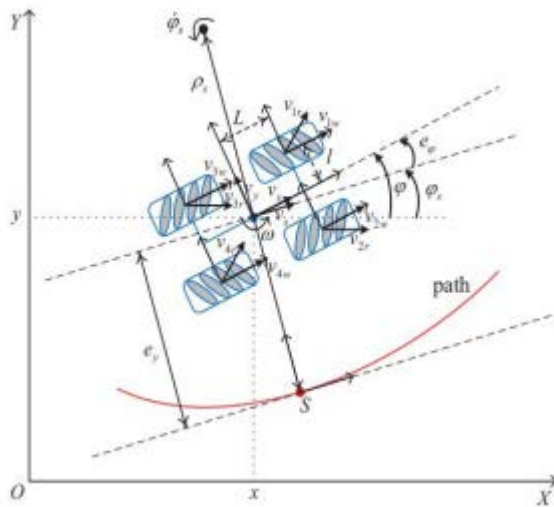
robotun hareket mekanizmalarının tasarımında, kontrolünde ve optimizasyonunda temel bir rol oynamaktadır. Örneğin, diferansiyel sürüş sistemine sahip bir robotun, her iki tekerleğin hızlarının nasıl ayarlanacağını bilmek, robotun düz bir çizgide ilerlemesini veya istenilen bir açıyla dönmesini sağlamaktadır.

Mobil robotların kinematik modelleri, genellikle robotun tekerleklerinin veya bacaklarının her birinin hareketlerini tanımlayan denklemlerle ifade edilmektedir. Bu denklemler, robotun genel hareketini etkileyen fiziksel kısıtlamaları ve hareket kabiliyetlerini dikkate almaktadır. Örneğin, bir tekerlekli robot için, tekerleklerin yere uyguladığı kuvvetler ve bu kuvvetlerin robotun hareket yönünü nasıl etkilediği önemlidir.

Bu alandaki araştırmalar, mobil robotların daha akıllı ve etkili bir şekilde hareket etmelerini sağlamak için sürekli olarak yeni yöntemler ve modeller geliştirmektedir. Gelişmiş kinematik modeller ve kontrol algoritmaları, robotların karmaşık çevrelerde daha iyi navigasyon yapmalarını, engelleri daha etkili bir şekilde aşmalarını ve belirli görevleri daha yüksek bir başarı oranıyla tamamlamalarını sağlamaktadır.

Uddin vd. (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, dört tekerlekli bir mobil robotun kinematik modellemesi ve hareket analizi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu model, robotun iki aktif ve iki pasif tekerleği, her biri bağımsız bir DC motoru tarafından sürülen çeviri ve dönme hareketleriyle, robotun hareket kabiliyetlerini sağlar. Bu araştırma, robotun hareketlerini temsil eden bir matematiksel modelin geliştirilmesi ve bu modelin parametrik denklemler kullanılarak doğrulanması sürecini içermektedir.

German vd. (2023) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, mobil robotların kinematik modellemesi ve hareket planlaması incelenmiştir. Araştırma, robotun tekerleklerinin hızı ile robotun hareketi arasındaki ilişkiyi bilerek, robotun istenilen bir yörüngeyi takip etmesini veya engellerden kaçınmasını sağlayacak bir kontrolör tasarlanmasının mümkün olduğunu göstermektedir. Bu model sayesinde robotun farklı senaryolarda hareketi simüle edilebilir böylece mobil robotun tasarımının test edilmesi ve optimizasyonu kolaylaşmış olur. Çok yönlü bir mobil robotun kinematik modeli Şekil 2.9'da görülmektedir.



Şekil 2.9. Çok yönlü bir mobil robotun kinematik modeli (German vd. 2023)

Şekil 2.10., diferansiyel sürürlü bir mobil robotun kinematik modelini göstermektedir, burada V mobil robotun doğrusal hızı ve ω açısal hızıdır, V_L ve V_R sırasıyla sol ve sağ tekerleklerin doğrusal hızlarıdır. $x(k)$ ve $y(k)$ robotun küresel koordinatlara (M) göre pozisyonunu temsil eder, $\theta(k)$ mobil robotun yönelimidir, L tekerlekler arası mesafedir, IRC anlık dönüş merkezidir ve R , IRC ile robotun kütle merkezi arasındaki mesafedir.

Eğrisel harekete dayanarak, aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\begin{cases} V_L = \omega \left(R - \frac{L}{2} \right) \\ V_R = \omega \left(R + \frac{L}{2} \right) \\ V = \omega (R) \end{cases} \quad (2.1)$$

Uygun şekilde manipüle edildiğinde, bu denklem tekerleklerin doğrusal hızlarına göre robotun doğrusal ve açısal hızlarının hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

$$\begin{cases} V = \frac{V_R + V_L}{2} \\ \omega = \frac{V_R - V_L}{L} \end{cases} \quad (2.2)$$

Mobil robotun kütle merkezine göre doğrusal ve açısal hızları elde edildikten sonra, bunlar sistemim global koordinatlarına dönüştürülür. Bunu yapmak için, doğrusal ve açısal hız aşağıdaki şekilde ayrıştırılır:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \theta \\ \dot{y} = V \sin \theta \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases} \quad (2.3)$$

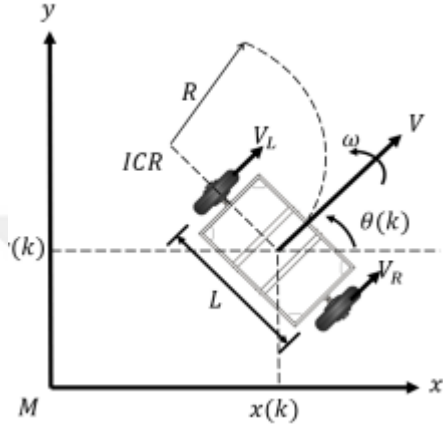
Denklem 2.2 ve 2.3'ün entegrasyonu ile aşağıdaki matris gösterimi elde edilmektedir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te V_R ve V_L için çözüm yapılarak mobil robotun ters kinematiği aşağıdaki gibi elde edilebilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos \theta}{2} & \frac{\cos \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{\sin \theta}{2} \\ \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_R \\ V_L \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Bu, robotun istenen doğrusal ve açısal hızlarına bağlı olarak tekerlek hızlarının kontrol edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 2.10. Diferansiyel bir robotun kinematik modeli (German vd. 2023)

Büyük ölçekli iş parçalarının robotik işlenmesi sırasında mobil robotların güvenliğini artırmak için bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, vida teorisini kullanarak mobil platformun hareketlerini analiz eder ve robot kolunun hareketleri ile mobil platformun hareketlerini ayırt etmek amacıyla bir yardımcı referans noktası belirler. Bu metodoloji mobil robotun işleme görevlerini daha stabil ve sorunsuz bir şekilde yerine getirmesine olanak tanımaktadır (Tao vd. 2022).

Sonuç olarak, mobil robot kinematiği, robotik alanında sürekli gelişen ve robotların etkileşim kabiliyetlerini ve navigasyon becerilerini geliştirmeye yönelik önemli katkılarda bulunan canlı bir araştırma alanıdır. Bu alandaki ilerlemeler, mobil robotların daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılmasına olanak tanımakta ve robotik teknolojilerin günlük yaşamımızda daha entegre ve etkili bir şekilde rol almasını sağlamaktadır.

2.1.5. Bahçe tarımında robotik uygulamalar

Robotik teknolojilerin bahçe tarımındaki uygulamaları, bitki yetiştiriciliğinde verimliliği ve sürdürülebilirliği artırmaya yönelik yenilikçi yöntemler sunmaktadır. Bu teknolojiler, ekim, sulama, ilaçlama gibi temel işlemlerden (Peña vd. 2018), budama, inceltme, püskürtme, hasat ve meyve taşıma gibi daha özelleşmiş görevlere kadar çeşitlilik göstermektedir.

Robotik platformlar, hibrit güç üniteleri, hareket kontrol sistemleri ve makine görüşü gibi bileşenlerin entegrasyonu, tarımsal operasyonların gerçekleştirilmesine

olanak tanımaktadır. Bu bileşenler, tekerlekli veya paletli platformlar üzerine monte edilerek, tarımsal robotların bitki yetiştiriciliğinde çeşitli görevleri yerine getirmesine imkân sağlamaktadırlar (Godzhayev vd. 2015).

Bahçe tarımında robotik sistemlerin gelişimi, sensörler, görev planlama algoritmaları ve insan-robot iş birliği gibi ileri teknolojilerle desteklenmektedir. Bu teknolojik ilerlemeler, tarım süreçlerini daha da otomatikleştirerek, verimliliği ve etkinliği artırmayı hedeflemektedir. Özel projeler, bahçe robotiği alanındaki inovasyonu öne çıkarmaktadır. Örneğin, TrimBot2020 projesi, dış mekanlarda çalı budama ve gül budama işlemlerini otomatik olarak gerçekleştirebilen ilk robotun geliştirilmesine odaklanmıştır, bu da robot teknolojisinin bahçe bakımı ve tarımında sunduğu potansiyeli göstermektedir (Strisciuglio vd. 2018)

Robotların bahçe tarımındaki uygulamaları, bitkileri tanımlama, sulama ve meyve hasadı gibi yeteneklerle donatılmış robotların geliştirilmesini içerir. Bu robotlar, bahçe tarımının daha verimli ve etkili hale getirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Correll vd. 2009).

Sensör teknolojisi, tarımsal robotların çeşitli görevleri yerine getirme kabiliyetini genişletmektedir. Sensörler, tarımsal robotların farmakolojik yönetimde ve mahsul verimlerinin artırılmasında kritik bir rol oynamaktadır bu da bahçe ve çiftlik tarımında robotik uygulamaların önemini vurgulamaktadır (Li vd. 2019).

Bu gelişmeler, bahçe tarımında robotik uygulamaların, tarımsal üretimde operasyonel verimliliği, bitki bakımının hassasiyetini ve genel karlılığı iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Robotik teknolojilerin entegrasyonu, tarım endüstrisi uygulamalarını ileriye taşıyacak vaat edici bir çözüm sunmaktadır.

2.1.5.1. SWEEPER

SWEEPER adı verilen robotik sistem, seralarda tatlı biber hasadı yapmak üzere geliştirilmiştir. Sistem, özel olarak tasarlanmış bir uç aparat, RGB-D kamera ve yüksek performanslı bir bilgisayar içeren altı serbestlik dereceli sanayi tipi bir robot kolundan oluşmaktadır. Bu bileşenler, boru rayları ve beton zemin üzerinde otomatik olarak hareket edebilen bir arabaya monte edilmiştir. Robotun çalışma prensibi, meyve tespiti, tutuş pozisyonunun tahmini ve hareket kontrolü algoritmalarıyla detaylandırılmıştır. Araştırma, SWEEPER'in tasarımını, validasyonunu ve ticari bir serada farklı çeşit ve büyüme koşulları altında geniş kapsamlı alan testlerini kapsamaktadır.

Toplamda 262 meyve üzerinde dört haftalık bir test süresince denemeler yapılmış, meyve başına ortalama hasat süresi 24 saniye olarak kaydedilmiştir. En uygun mahsul koşullarında %61, mevcut mahsul koşullarında ise %18 başarı oranına ulaşılmıştır. Bu sonuçlar, robotik hasadın başarısının, uygun mahsul koşullarının ve çeşitlerinin belirlenmesinin önemini vurgulamaktadır. Testler ayrıca, robotun saha performansının çeşitli değişkenler tarafından nasıl etkilendiğini ve çevresel faktörlerin robotik sistem üzerindeki etkilerini de ortaya koymaktadır (Arad vd. 2020).

Şekil 2.11’de robotun prototipi görülmekte olup burada CB kontrolör güç kutusu ve ağını, CE uç efektör kontrol kutusunu, FC FANUC robot kontrolörünü, PA basınçlı hava için kompresörü, PC bilgisayarı ve PW invertörü göstermektedir.



Şekil 2.11. SWEEPER prototipi (Arad vd. 2020)

2.1.5.2. LADYBIRD

Çeşitli sebzelerin; izlemesi, haritalanması, sınıflandırılması ve tespiti için otonom çok amaçlı bir saha robotudur (Ramin Shamshiri vd. 2018).

Sistem, bireysel bitkilere mikro miktarda sıvı püskürtme yeteneğine sahip olup, bu işlemi manipülör kolu üzerine monte edilmiş ince bir püskürtme nozulu aracılığıyla gerçekleştirmektedir. Bu teknoloji, girdi maliyetlerini azaltmayı, çevresel etkiyi düşürmeyi ve özellikle mikro-besin sağlama, seyreltme ve yabancı ot kontrolü gibi uygulamalar için üretkenliği artırmayı hedeflemektedir.

"Ladybird" platformu, hedefe yönelik püskürtme için geliştirilen bir yazılım altyapısını barındırmakta olup, bu altyapı görüntü tabanlı fide tespiti, geometri ve dönüşüm, kamera-kol kalibrasyonu, ters kinematikler ve hedef sıra optimizasyonunu içermektedir (Şekil 2.12). Sistem, sürekli yönlendirilebilen nozul yapısıyla mevcut yaklaşımlardan ayrılmakta ve daha geniş bir çalışma alanında hedeflere hassas bir şekilde ulaşabilmektedir.

Çalışma, Sydney Üniversitesi'nin Hava, Mekanik ve Mekatronik Mühendisliği Okulu bünyesindeki Avustralya Sahada Robotik Merkezi ve Hortikültür İnovasyon Avustralya tarafından desteklenmiş olup, "Ladybird" robotunun sebze endüstrisi için esnek bir araştırma platformu olarak tasarım ve inşasına öncülük etmiştir.

Detaylı bitki algılama ve hedefe yönelik sıvı uygulaması süreci, robotun hareketsiz kaldığı durumlar için gerçekleştirilmekte, hedefler stereo kamera kullanılarak tespit edildikten sonra, koordinatlar kol çerçevesine dönüştürülerek ters kinematik

çözümleri uygulanmakta ve nozulun her hedefe doğrultulması sağlanmaktadır. Daha sonra, sıra optimizasyonu yapılarak hedeflere püskürtülmekte ve "Ladybird" bir sonraki noktaya geçmektedir.

Bu yenilikçi sistem, sebze tarımında hassasiyet gerektiren uygulamalar için büyük potansiyel sunmakta ve mevcut teknolojilerin ötesinde bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Her bitkiye özgü gereksinimlerin mikro yönetimini sağlayarak, tarımın dijitalleşmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır (Underwood vd. 2015).



Şekil 2.12. Ladybird alana nokta püskürtme (Underwood vd. 2015)

2.1.5.3. BoniRob

Disiplinler arası takımlar tarafından geliştirilen çok amaçlı entegre tarım robotik platformu, sıralı bitkilerin yabancı ot kontrolü için kullanılmaktadır ve aynı zamanda detaylı bir alan haritası oluşturma yeteneğine sahiptir. Bu platform, yabancı otları ve bitkileri ayırt etmek için yapay zekâ teknolojilerinden yararlanmakta ve tespit edilen yabancı otları mekanik olarak yok etmek için "yabancı ölüm çubuğu" adı verilen özel bir mekanizma kullanmaktadır. BoniRob'un farklı kontrol modülleri, Ethernet aracılığıyla birbirine bağlanmakta ve TCP/IP protokolü kullanarak iletişim kurmaktadır. Platform, çeşitli elektro-motorlar ve hidrolik silindirlere tarafından yönetilen 16 serbestlik derecesine (DOF) sahiptir. Dört tekerlek, bağımsız olarak yönlendirilebilmekte ve her bir tekerlek ayrı motorlar tarafından tahrik edilmektedir; motor kontrolörleri bir CAN (Control Area Network) veri yolu ile bağlanmaktadır. Bu incelemeler, yabancı otların yok edilmesi için tamamen ticari bir robotik platformun henüz geliştirilmediğini ortaya koymaktadır. Ek olarak, robotik yabancı ot kontrolü alanındaki çoğu araştırma çalışması, bitki büyümesinden önce veya bazı durumlarda ana bitkinin yüksekliği 0.2-0.3 m arasında olduğunda uygulanabilir olduğu belirlenmiştir (Ramin Shamsiri vd. 2018).



Şekil 2.13. BoniRob (Ramin Shamshiri vd. 2018)

2.1.5.4. Thorvald II

Mobil tarım robotlarıyla çalışan araştırmacılar, açık alanlar, seralar ve politünel gibi çeşitli ortamlarda çalışma eğilimindedir. Tarım robotları, şimdiye kadar yalnızca tek bir tür ortamda faaliyet gösterecek şekilde tasarlanmıştır ve özelleştirme olasılığı yoktur veya sınırlıdır. Thorvald II, aynı temel modülleri kullanarak çok çeşitli robotların inşa edilmesine ve sadece temel el aletleriyle yeniden monte edilmesine olanak tanıyan yeni bir modüler robot tasarımıdır. Modüller, belirli bir ortam ve uygulama için hızlıca uyarlanabilen yüksek kaliteli robotlar sunmak amacıyla tasarlanmıştır (Grimstad ve From 2017b).

Thorvald II platformunun ardındaki temel motivasyon hem donanım hem de yazılım tarafında tamamen modüler bir yapı geliştirilmesidir. Bu bağlamda, donanım modülerliği, standart modüllerden oluşan ve çeşitli ortamlarda basit işlemlerle yeniden yapılandırılabilen bir robotu ifade etmektedir. Bu robotlar mekanik tasarımları açısından birbirinden farklı olmasına rağmen, tümü aynı modülleri kullanmaktadır. Şekil 2.14'te bazı örnekler sunulmuştur. Yazılım modülerliği ise, donanım modülerliği ile, programcıların robotun genel görevine odaklanmalarını sağlayan ve robotun hangi ortamda veya koşullar altında çalışacağı konusunda endişelenmelerine gerek kalmayan bir işletim sistemini ifade etmektedir. Bu, yazılım tarafından otomatik olarak yönetilmektedir. Böylece, robotun bir serada mı yoksa açık bir alanda mı çalıştığı, ürünün buğday mı yoksa çilek mi olduğu gibi faktörlerden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir (Grimstad ve From 2017a).



Şekil 2.14. Thorvald II modüllerinden toplanan robotlara birkaç örnek.

2.2. GPS (Global Positioning System)

Global Positioning System (GPS) navigasyon sistemleri, konum belirleme, yönlendirme ve izleme işlevleriyle hem bireysel kullanıcılar hem de endüstriyel uygulamalar için vazgeçilmez hale gelmiştir. GPS navigasyon sistemleri, yeryüzündeki bir konumu belirlemek için uydu sinyallerini kullanmaktadır. Bu sistemlerin doğruluğu ve güvenilirliği, modern ulaşım ve lojistik sektörlerinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

GPS navigasyon sistemlerinin temel çalışma prensibi, uydulardan gelen sinyallerin analiz edilmesi ve bu sinyallerin alıcının konumunu hesaplamak için kullanılmasıdır. GPS, dört veya daha fazla uydu tarafından gönderilen sinyalleri alarak, kullanıcının tam konumunu belirlemektedir. Trilaterasyon adı verilen bu yöntem, kullanıcıya hem yatay hem de dikey pozisyonda hassas bir konum bilgisi sunmaktadır. GPS alıcıları, bu sinyalleri işleyerek kullanıcıya doğru rota ve yön bilgilerini sağlarlar (Abbott ve Powell 1999).

GPS navigasyon sistemlerinin kullanımı, çeşitli alanlarda büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe, GPS tabanlı navigasyon sistemleri sürücülerin doğru ve hızlı bir şekilde hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmaktadır. Bu sistemler, yol tarifi sağlama, trafik durumu hakkında bilgi verme ve alternatif güzergahlar önerme gibi işlevlerle sürücülerin yolculuklarını daha güvenli ve verimli hale getirmektedir. GPS navigasyon sistemlerinin, mobil cihazlarla entegrasyonu sayesinde kullanıcılar her an her yerde bu hizmetlerden faydalanabilmektedir (Khraisat vd. 2011).

Ayrıca, GPS navigasyon sistemlerinin lojistik ve taşımacılık sektöründe de önemli bir yeri vardır. Nakliye ve dağıtım firmaları, araç filolarını izlemek ve yönetmek için GPS teknolojisini kullanmaktadır. Bu sayede, araçların konumu anlık olarak takip edilebilmekte ve rotalar optimize edilerek maliyetler düşürülmektedir. Ayrıca, teslimat süreleri kısaltılarak müşteri memnuniyeti artırılmaktadır. GPS'in sağladığı bu avantajlar,

lojistik süreçlerin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesini mümkün kılmaktadır (Xiao ve Zhang 2002).

GPS, herhangi bir noktanın dünya üzerindeki coğrafi konumunu belirlemek için kullanılan uydu tabanlı bir navigasyon sistemidir. Bu sistem, dünya yüzeyinden yaklaşık 20,180 kilometre yükseklikte, sürekli olarak zaman ve konum bilgilerini kodlanmış biçimde yayan 24 adet uydu içermektedir. Bu uydular, altı farklı yörüngede konumlandırılmış olup, her bir yörüngede dört uydu bulunmaktadır. Her bir uydu, yörüngesindeki dönüşünü 12 saatte tamamlamaktadır. Bu düzenleme sayesinde, her uydu 24 saat içinde aynı noktadan iki kez geçmektedir.



Şekil 2.15. Dünya üzerinde 6 farklı yörüngede dönen 24 uydu

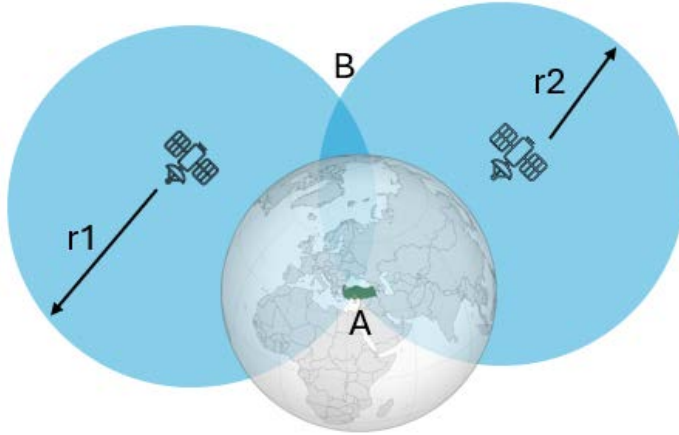
GPS kullanımı sayesinde, dünya üzerindeki herhangi bir noktanın iki önemli coğrafi özelliği belirlenebilir. Bu değerler şunlardır:

- Noktanın dünya üzerindeki kesin konumu (enlem, boylam ve rakım), yaklaşık olarak 20 metre ile 1 milimetre arasında değişen bir hassasiyetle.
- Hassas zaman bilgisi (Universal Time Coordinated, UTC), yaklaşık olarak 60 nanosaniye ile 5 nanosaniye arasında bir hassasiyetle.



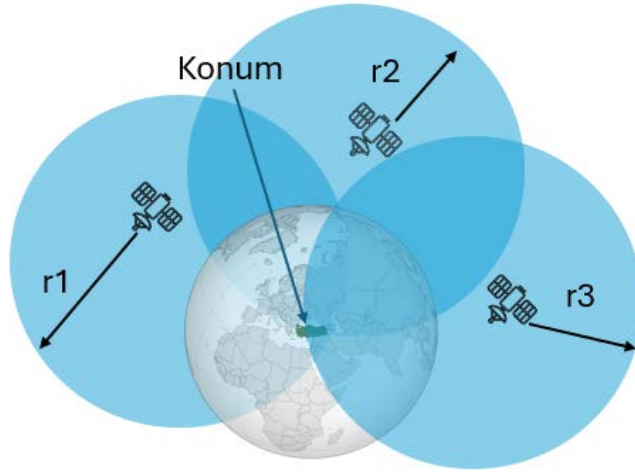
Şekil 2.16. GPS'in ana işlevi

Bir yerin konumu, triangülasyon yöntemi ile belirlenir. Her bir uydu, r yarıçapında bir çember oluşturarak mikrodalga radyo sinyalleri aracılığıyla konum ve saat bilgilerini iletir. Coğrafi bir noktanın 2 boyutlu bir sistemde (enlem ve boylam) konumunu belirlemek için iki uydu yeterli olmaktadır. Uydular tarafından oluşturulan çemberler, iki noktada kesişirler (Şekil 2.17.).



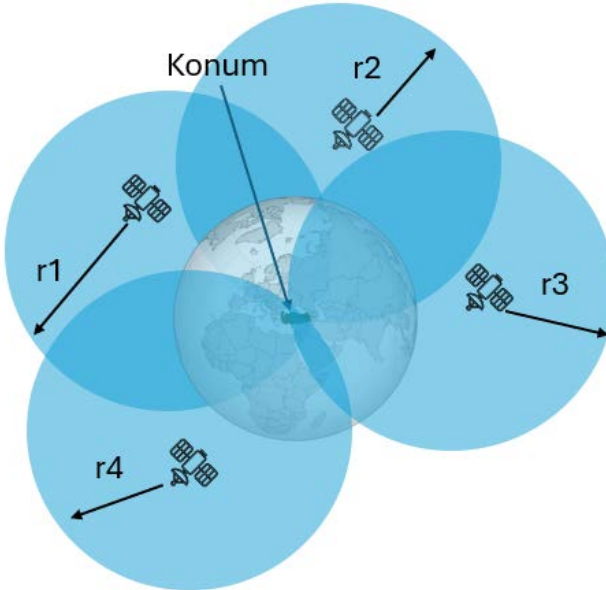
Şekil 2.17. 2D konumun belirlenmesi

Bu iki nokta birbirinden oldukça uzak mesafelerde bulunduğundan, dikey konumda yapılan ölçümlerin hassasiyeti düşüktür. Bu nedenle, dikey hassasiyeti artırmak için diğer bir üçüncü bir uyduya ihtiyaç vardır (Şekil 2.18.).



Şekil 2.18. Hassasiyeti dikey olarak arttırılmış 2D konum belirleme

Üç boyutlu bir sistemde (yükseklik, enlem ve boylam) konum belirleme işlemi için dördüncü bir uyduya ihtiyaç duyulduğu belirlenmiştir (Şekil 2.19.). Bu nedenle, GPS alıcıları koordinatları doğru bir şekilde belirleyebilmek için en az dört uydudan gelen sinyalleri kullanmaları gerekmektedir. Alınan uydu sayısının artması, ölçüm hassasiyetinin de artmasına katkıda bulunmaktadır (Zogg 2002).



Şekil 2.19. 3 boyutlu konum belirleme

2.2.1. GPS navigasyon mesajı

GPS navigasyon mesajları, uydulardan alınan anlık konum verilerinin iletilmesi ve sinyal aktarım sürelerinin hesaplanabilmesi için kritik öneme sahiptirler. Bu mesajların iletilmesi, yüksek frekanslı (HF) taşıyıcı dalgalar üzerine modüle edilerek gerçekleştirilmektedir. Veriler, sayfa (page) veya çerçeve (frame) olarak adlandırılan mantıksal yapılar halinde gruplandırılarak aktarılırlar.

GPS uydularının yayınladığı mesajlar, belirli bir yapıya sahiptirler. Bu yapılar, verilerin doğru ve güvenilir bir şekilde iletilmesini sağlamaktadırlar. Bir GPS mesajı, 1500 bit uzunluğunda bir çerçeveden oluşur ve bu çerçevenin aktarım süresi 30 saniyedir. Her çerçeve, beş alt çerçeveye (subframe) ayrılır ve her bir alt çerçeve 300 bit uzunluğunda olup, aktarım süresi 6 saniyedir (Beyerle vd. 2009).

Almanak verileri, uyduların yörünge bilgilerini ve saat verilerini içermektedir. Bu bilgiler, GPS alıcılarının hızlı bir şekilde sinyal almasını ve konum belirlemesini sağlamaktadır. Tüm almanak bilgisinin iletilmesi için 25 farklı çerçeve gereklidir. Dolayısıyla, almanak bilgisinin tamamının aktarılması 12,5 dakika sürmektedir. Bir GPS alıcısının tam işlevselliğe ulaşabilmesi için, en az bir kere tüm almanak verilerini toplamaları gerekmektedir (Henkel 2011).

GPS alıcıları, ilk kullanım sırasında tüm almanak bilgisini toplamak zorundadır. Bu işlem, alıcının tüm uydularla iletişim kurmasını gerektirdiği için zaman almaktadır. Ancak, bu işlem tamamlandıktan sonra, alıcı sonraki çalışmalarında daha hızlı açılmakta ve çalışmaya başlamaktadır. GPS alıcısının hızlı çalışması için uydularla sürekli olarak veri alışverişi yapması önemlidir.

GPS sinyalleri, HF taşıyıcı dalgalar üzerine modüle edilerek iletilir. Bu taşıyıcı dalgalar, verilerin uzun mesafeler boyunca güvenilir bir şekilde iletilmesini sağlamaktadırlar. Modülasyon işlemi, verilerin doğru bir şekilde kodlanmasını ve alıcı tarafından çözülmesini sağlamaktadır. GPS sinyalleri, hem askeri hem de sivil kullanımlar için kritik öneme sahip olan güvenilir ve hassas konum bilgilerini sağlamaktadırlar (Richert ve El-Sheimy 2007).

2.2.2. Bir noktaya ait konumun GPS ile hesaplanması

Dünya üzerinde bir noktanın 3D (enlem, boylam, yükseklik) boyutlarındaki konum ve hızının belirlenebilmesi için bir GPS alıcısının en az dört farklı uyduyla iletişim kurması gerekmektedir. Bu noktanın uydulara olan uzaklığı, sinyalin iletim süresi yardımıyla belirlenir. Genel bir kural olarak, ışık hızı (c), sinyal geçiş süresi (τ) ile çarpılarak, uydula alıcı arasındaki mesafe (d) hesaplanmaktadır.

Yörüngede bulunan tüm uydular, Code Division Multiple Access (CDMA Multiplex) yöntemi kullanarak, aynı frekansta farklı C/A kodları ile L1 sinyali yayınlamaktadırlar. Bu yöntemle, sinyal kurtarma ve uydu tanımlamaları korelasyon yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. GPS alıcılarında, aktif olarak kullanılan tüm uyduların C/A kodları önceden yüklenmiştir. Alıcıya bir uydu sinyali ulaştığında, alıcı bu gelen sinyale uygun bir referans sinyal üretmektedir. Üretilen referans sinyal, gelen sinyal ile tam olarak eşleşene kadar kaydırma işlemine tabi tutulur. Eşleşme tamamlandığında, Korelasyon Faktörü (CF) değeri 1 olur ve bu durum, korelasyon noktasının oluştuğunu

gösterir. Korelasyon noktası, sinyali gönderen uydunun belirlenmesi ve sinyalin gerçek aktarım süresinin ölçülmesi amacıyla kullanılmaktadır (Zogg 2002).

Alıcıya bir uydu sinyali ulaştığında, alıcı bu gelen sinyale uygun bir referans sinyal üretmektedir. Üretilen referans sinyal, gelen sinyal ile tam olarak eşleşene kadar kaydırma işlemine tabi tutulur.

Korelasyon kalitesi, korelasyon faktörü (CF) ile ifade edilir. CF, -1 ile +1 aralığında değişen değerler alabilmektedir. Uydu sinyali ile alıcının oluşturduğu referans sinyal tam olarak örtüştüğünde, CF değeri +1 olarak belirlenir.

$$CF = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N [(mb) - (ub)] \quad (2.6)$$

Burada:

mb: bütün eşleşen bitlerin miktarı
ub: bütün eşleşmeyen bitlerin miktarı
N: bitlerin incelenen miktarı

Başlangıçta yalnızca askeri amaçlar için tasarlanmış olan GPS sistemi, günümüzde topografya, çeşitli taşıma araçlarıyla navigasyon, konum belirleme, sabit ve mobil objelerin takibi ve hız ölçümü gibi birçok sivil alanda da etkin şekilde kullanılmaktadır. Sistemi yöneten servis, Çizelge 2.1'de belirtilen sivil kullanım için hassasiyet değerlerini %95 doğrulukla sağlamayı taahhüt etmektedir.

Çizelge 2.1. Sivil kullanım için standart hassasiyet değerleri

Yatay Hassasiyet	Dikey Hassasiyet	Zaman Hassasiyeti
≤ 13 m	≤ 22 m	~ 40 ns

Belirtilen hassasiyet değerleri, özel ölçüm teknikleri (faz ölçümü) ve ek donanımlar (Diferansiyel GPS – DGPS) kullanılarak santimetre seviyelerine kadar düşürülebilmektedir. Bir noktanın konumunu hesaplamak için bir GPS alıcısının, zaman sinyallerini ($\Delta t_1 \dots \Delta t_4$) belirlemek amacıyla en az dört farklı uydudan (Uydu1 ... Uydu4) sinyal alması gerekmektedir.

Konum tespiti için yapılan hesaplamalar, kartezyen koordinat sisteminden etkilenmektedir. Kartezyen, Dünya merkezli üç boyutlu bir koordinat sistemidir. Bir GPS alıcısının (kullanıcının), dört uydu (R1, R2, R3 ve R4) ile olan mesafeleri, sinyal aktarım süreleri (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 ve Δt_4) kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bu süreç sonucunda, koordinatları bilinen dört uydu yardımıyla kullanıcının koordinatları da belirlenebilmektedir.

Uydularda yer alan atomik saatler aracılığıyla sinyal iletim süresi dikkatlice ölçülebilir. Uydu saatleri birbiriyle ve evrensel zaman koordinatlarıyla ayarlanmış ve senkronize edilmiştir. Ancak, GPS alıcıları evrensel koordinat zamanıyla (UTC) senkronize edilmemiştir. Bu sebeple, alıcı saati ile uydu saati arasında bir zaman farkı mevcuttur (Δt_0). Eğer alıcı Δt_0 'ya göre yavaşsa bu fark negatif, hızlıysa pozitif olacaktır.

Δt_0 'nun bileşik zaman hatası, sinyal iletim süresinin hesaplanmasında ve alıcı ile uydu arasındaki mesafenin belirlenmesinde hatalara yol açmaktadır. Dolayısıyla, bu hatadan kaynaklanan yanlış mesafe ölçümü, sahte mesafe (PSR- Pseudo Range) olarak adlandırılmaktadır. Sahte mesafenin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmaktadır (Zogg 2002).

$$\Delta t_{ölçülen} = \Delta t + \Delta t_0 \quad (2.7)$$

$$PSR = \Delta t_{ölçülen} \times c = (\Delta t + \Delta t_0) \quad (2.8)$$

$$PSR = R + \Delta t_0 \times c \quad (2.9)$$

Burada;

- R: kullanıcı ve uydu arasındaki gerçek uzaklık
- c: ışık hızı
- Δt : kullanıcı ile uydu arasındaki sinyal iletim süresi
- Δt_0 : uydu saati ile alıcı saati arasındaki süre farkı
- PSR: sahte mesafe (hatalı mesafe)

Uydu ile alıcı arasındaki mesafe, kartezyen koordinat sisteminde aşağıdaki denklemle hesaplanabilir:

$$R = \sqrt{(X_{uydu} - X_{kul})^2 + (Y_{uydu} - Y_{kul})^2 + (Z_{uydu} - Z_{kul})^2} \quad (2.10)$$

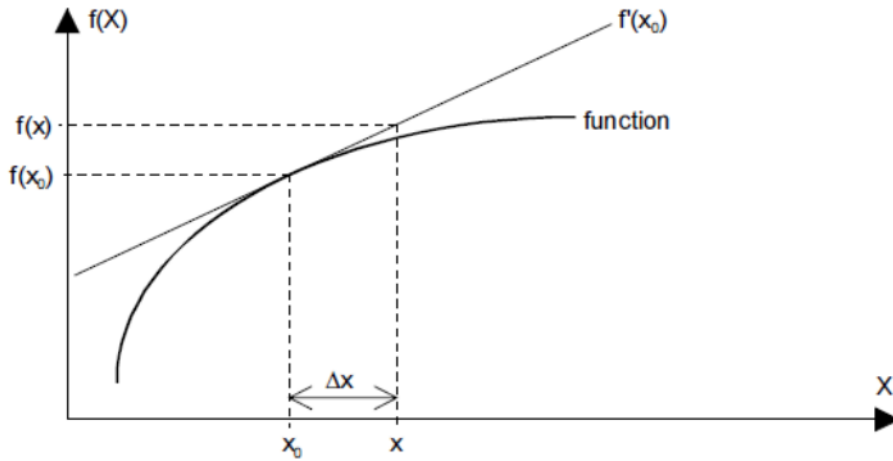
PSR (sahte mesafe) değerini hesaplamak için:

$$PSR = \sqrt{(X_{uydu} - X_{kul})^2 + (Y_{uydu} - Y_{kul})^2 + (Z_{uydu} - Z_{kul})^2} + c \times \Delta t_0 \quad (2.11)$$

Koordinatı bilinen dört uydu ($i=1 \dots 4$) için verilen eşitlikler yeniden formüle edilirse:

$$PSR_i = \sqrt{(X_{uydu_i} - X_{kul})^2 + (Y_{uydu_i} - Y_{kul})^2 + (Z_{uydu_i} - Z_{kul})^2} + c \times \Delta t_0 \quad (2.12)$$

Dört ayrı uyduya ait dört denklem, doğrusal olmayan bir denklem seti oluşturmaktadır. Bu doğrusal olmayan denklem setini çözebilmek için başlangıçta, kök fonksiyonunun Taylor modelinin birinci dereceden terimi ile doğrusallaştırma yapılmaktadır.



Şekil 2.20. Taylor serilerinin dönüşümü

Taylor modelinde;

$$\Delta x = x - x_0 \quad (2.13)$$

$$f(x) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!} \times \Delta x + \frac{f''(x_0)}{2!} \times \Delta x^2 + \frac{f'''(x_0)}{3!} \times \Delta x^3 + \dots \quad (2.14)$$

Birinci parçaya göre sadeleştirilmiş durumu:

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0) \times \Delta x \quad (2.15)$$

Doğrusallaştırma işlemi için, x_0 olarak rastgele tahmin edilen değer, x değerine yakın olacak biçimde seçilmelidir. GPS sistemi bağlamında bu, başlangıçta gerçek koordinatların hesaplanması yerine tahmini koordinatların kullanılmasının tercih edildiği anlamına gelmektedir.

Hesaplama sürecinde, bilinmeyen değişkenler (Δx , Δy ve Δz) tarafından kaynaklanan bir hata, tahmini konumda mevcuttur.

$$X_{kul} = X_{tah} + \Delta x \quad (2.16)$$

$$Y_{kul} = Y_{tah} + \Delta y \quad (2.17)$$

$$Z_{kul} = Z_{tah} + \Delta z \quad (2.18)$$

Dört uydu tarafından sağlanan tahmini konumlar kullanılarak, uydular ve kullanıcı arasındaki mesafe (R_{tah}), Eşitlik 2.2'ye benzer şekilde hesaplanabilmektedir.

$$R_{tah} = \sqrt{(X_{uydu_i} - X_{tah})^2 + (Y_{uydu_i} - Y_{tah})^2 + (Z_{uydu_i} - Z_{tah})^2} \quad (2.19)$$

Eşitlik 2.12 ve 2.14, eşitlik 2.19 ile birleştirilerek sahte uzaklık hesaplanabilir.

$$PSR_i = R_{tah_i} + \frac{\partial(R_{tah_i})}{\partial x} \times \Delta x + \frac{\partial(R_{tah_i})}{\partial y} \times \Delta y + \frac{\partial(R_{tah_i})}{\partial z} \times \Delta z + c \times \Delta t_0 \quad (2.20)$$

Kısmi türev eşitlik 2.20 üzerine uygulanırsa:

$$PSR_i = R_{tah_i} + \frac{X_{tah} - X_{uydu_i}}{R_{tah_i}} \times \Delta x + \frac{Y_{tah} - Y_{uydu_i}}{R_{tah_i}} \times \Delta y + \frac{Z_{tah} - Z_{uydu_i}}{R_{tah_i}} \times \Delta z + c \times \Delta t_0 \quad (2.21)$$

Eşitlik 2.21'e transpoze işlemi uygulandıktan sonra, denklemler lineer cebir yöntemleriyle çözülebilmektedir:

$$\begin{bmatrix} PSR_1 - R_{tah1} \\ PSR_2 - R_{tah2} \\ PSR_3 - R_{tah3} \\ PSR_4 - R_{tah4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & c \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_1}}{R_{tah_1}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_2}}{R_{tah_2}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_3}}{R_{tah_3}} & c \\ \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & \frac{X_{tah} - X_{uydu_4}}{R_{tah_4}} & c \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} PSR_1 - R_{tah1} \\ PSR_2 - R_{tah2} \\ PSR_3 - R_{tah3} \\ PSR_4 - R_{tah4} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Eşitlik 2.23'te belirlenen Δx , Δy ve Δz değerleri, tahmini X_{tah} , Y_{tah} ve Z_{tah} büyüklüklerinin yeniden belirlenmesi sürecinde kullanılmaktadır. Bu yeniden hesaplanan X_{tah} , Y_{tah} ve Z_{tah} büyüklükleri, normal iterasyon prosedürü ile Eşitlik 2.23 içerisine tekrar dahil edilmelidir. Bu süreç, Δx , Δy ve Δz değerleri istenilen hata seviyesine (örneğin 0.1 m) ulaşana dek sürdürülmelidir. İlk tahminlemeler sonucunda, Δx , Δy ve Δz değerlerinin 1 cm altına inmesi için en az üç kez iterasyon yapılması gerekmektedir.

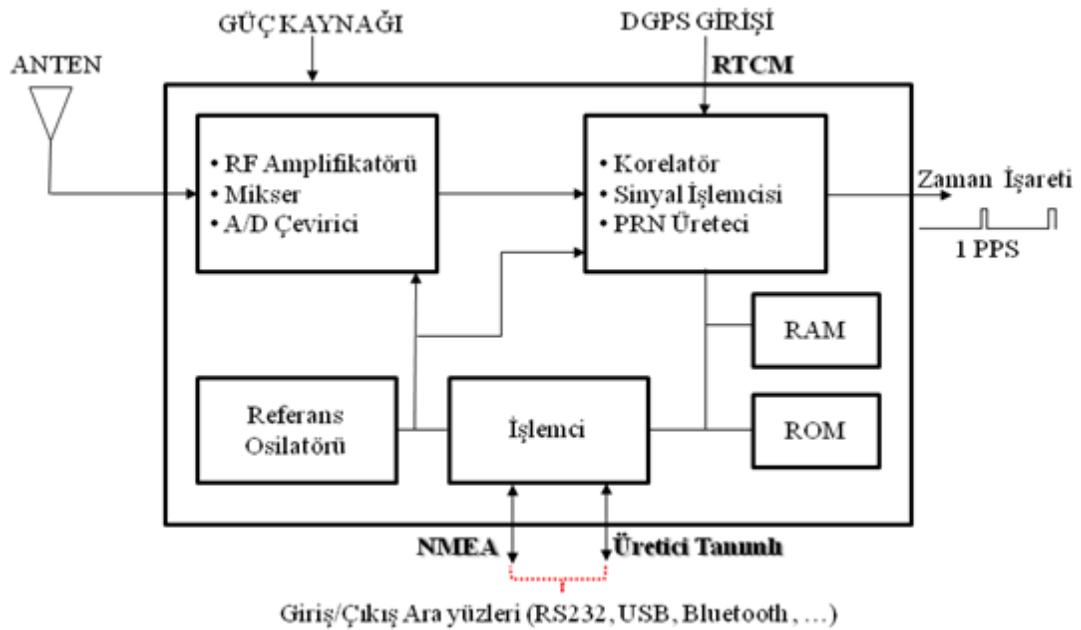
2.2.3. GPS alıcısı ve veri iletişim formatları

GPS alıcıları, dünya çapında konum, hız ve zaman bilgisi sağlamak için Küresel Konumlama Sistemi (GPS) uydularından gelen sinyalleri kullanmaktadır. Bu alıcılar, belirli temel işlemleri gerçekleştirmek zorundadır: uydu seçimi, sinyal alımı, takip ve ölçüm, veri kurtarma ve nihayetinde navigasyon çözümünün elde edilmesi. Bu işlemler, alıcının performans sınırlarını belirlerler ve alıcının dinamik çevrelerde ve parazitli ortamlarda nasıl çalışacağını etkilemektedirler (GLAZER 1978).

GPS alıcıları, dörtten fazla uydu tarafından gönderilen zayıf sinyalleri analiz

ederek konumlarını doğru bir biçimde tespit ederler. Bu alıcılar, konum ve zaman bilgilerinin yanı sıra hız ve ivme gibi fiziksel ölçütleri de hesaplayabilirler. Ek olarak, bu alıcılar izlenen uyduların durumları ile sayıları hakkında da bilgi sağlarlar.

GPS alıcısı, L1 ve L2 sinyallerini anten aracılığıyla aldıktan sonra, bu sinyaller bir RF (Radyo Frekansı) amplifikatörüyle güçlendirilir ve daha sonra düşük ara frekansa indirgenirler. Ara frekanstaki analog sinyal, 2 bitlik bir ADC (Analog Dijital Dönüştürücü) ile dijital sinyale çevrilmiştir. Referans Osilatör, hem işlemci ile korelatör için gereken saat frekansını sağlar hem de frekans çevrimi sırasında kullanılmak üzere taşıyıcı dalga sinyalini üretmektedir. GPS alıcısına ulaşan uydudan gelen sinyalin iletim süresi, PRN üreticinin oluşturduğu sinyal ile alınan PRN sinyalinin korelasyonu sonucunda hesaplanmaktadır. Bu iki sinyal arasındaki zaman farkı, sinyalin iletim süresini belirlemektedir. Sinyal işlemcisi, alıcının kapasitesine bağlı olarak aynı anda en fazla 16 uydu sinyalini işleyebilir. Konum tespiti ve diğer parametrelerin hesaplamaları işlemci üzerinde yapılmaktadır. GPS alıcıları için standartlaşmış iki temel veri iletişim formatı bulunmaktadır. Bunlardan biri DGPS düzeltme sinyallerinde kullanılan RTCM formatı, diğeri ise alıcı tarafından hesaplanan verilerin çeşitli platformlara iletilmesini sağlayan NMEA formatıdır. Bu formatlardan başka kullanılan veri iletişim formatları, üretici firmalara göre farklılık gösterebilmektedir (Ünal 2012). Şekil 2.21’de GPS alıcılarının blok şeması görülmektedir.



Şekil 2.21. GPS alıcısının blok şeması (Zogg 2002)

2.2.3.1. NMEA veri iletişim formatı

National Marine Electronics Association (NMEA) tarafından geliştirilen NMEA-0183 protokolü, GPS (Global Positioning System) alıcıları ve diğer deniz elektroniği cihazları arasında veri iletişimini sağlamak amacıyla kullanılan bir ASCII (American Standard Code for Information Interchange) tabanlı veri iletişim formatıdır. Bu protokol,

çeşitli GPS cihazlarından bilgisayara veya diğer cihazlara seri port üzerinden veri aktarımını standartlaştırmak için kullanılmaktadır.

NMEA veri iletişim formatı üzerine yapılan çalışmalar, gemi navigasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bu protokolün farklı yönlerini ele almıştır. NMEA 2000 standardı, gemi üzerindeki radar, GPS alıcısı, AIS (Automatic Identification System), gyro pusula gibi navigasyon ekipmanları arasında çift yönlü iletişimi sağlamak için tasarlanmış olup, fiziksel ve veri bağlantı katmanı olarak ISO (International Organization for Standardization) 11898 tarafından standardize edilen CAN teknolojisine dayanmaktadır (Srećko 2013). NMEA 0183 protokolü ise birçok deniz aracı tarafından kullanılan ortak bir protokol olup, özellikle otonom yüzey araçlarında farklı veri formatlarının tek bir formatta toplanmasını ve GPS verileriyle senkronize edilmesini sağlamaktadır. NMEA-0183 veri akışlarının ayrıştırılması üzerine yapılan çalışmalar, bu protokolün navigasyon sistemlerindeki önemini vurgulamakta ve orijinal veri çıkarma, işleme ve iletim sürecini detaylandırmaktadır (Dang vd. 2023). NMEA 2000, mevcut çoklu kabloların yerine tek bir ağ kablosu kullanarak veri iletim hızını önemli ölçüde artırmakta ve denizcilik ekipmanlarının entegrasyonunu kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, NMEA 0183 veri cümlelerini Ethernet üzerinden iletmek için geliştirilen arayüz kontrolörleri, bu verilerin kullanıcı uygulamalarıyla şeffaf bir şekilde entegre edilmesini sağlamaktadır (Michael 2003).

GPS alıcıları, hesapladıkları değişkenleri (konum, hız, rota gibi) çeşitli çevre birimlerine (bilgisayar, ekran, verici gibi) iletmek için farklı ara yüzler (RS232, USB, Bluetooth gibi) kullanır. Elde edilen değişkenler, bu ara yüzler aracılığıyla özel bir format kullanılarak yayınlanır. Bu özel format, veri alışverişinin sorunsuz gerçekleşmesi için NMEA tarafından standartlaştırılmıştır. Günümüzde, GPS verileri genellikle NMEA-0183 standardına uygun olarak iletilmektedir. GPS verileri, yaygın olarak kullanılan yedi temel veri seti aracılığıyla aktarılır. Bu veri setleri, çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere detaylı bilgi sağlar (NMEA 0183 1998).

- GGA (GPS için sabit veri)
- GGL (Coğrafik pozisyon, enlem- boylam)
- GSA (Aktif olan uyduların durumları hakkında bilgiler)
- GSV (İzlenen uydular hakkında bilgiler)
- RMC (Önerilen en az navigasyon bilgileri)
- VTG (Yer hızı, yatay seyir, ilerleme hızı ve hız bilgileri)
- ZDA (saat ve tarih bilgileri)

2.2.4. Coğrafi konum sistemleri

Coğrafi Konum Sistemleri (CKS), belirli bir yerin coğrafi koordinatlarını tespit etmek için kullanılan teknolojilerdir. CKS, küresel ölçekte navigasyon, haritalama, izleme ve coğrafi analiz gibi birçok alanda geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler.

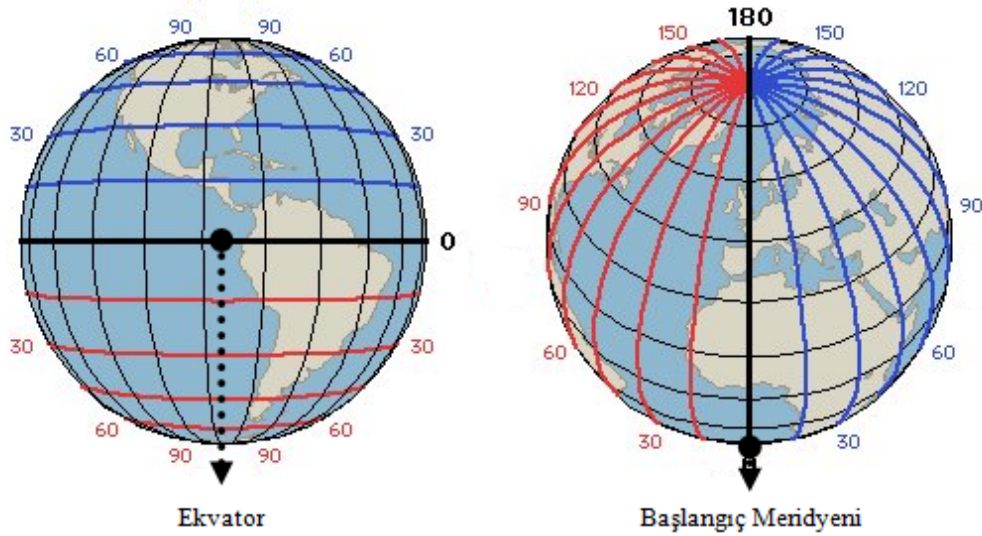
Coğrafi Konum Sistemleri, yeryüzündeki herhangi bir noktayı belirlemek için kullanılan uydular, alıcılar ve algoritmalarından oluşan bir teknolojik sistemdir. GPS, en yaygın kullanılan CKS türüdür ve dünya çapında milyarlarca kullanıcı tarafından çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. GPS, hassas konum belirleme, harita oluşturma ve yol bulma gibi temel işlevleri yerine getirmektedir (Classen 1977).

CKS, özellikle taşımacılık, lojistik, tarım, çevre izleme ve kamu güvenliği gibi alanlarda büyük öneme sahiptir. Örneğin, tarımda hassas tarım uygulamaları, GPS teknolojisini kullanarak ekim, sulama ve hasat işlemlerini optimize etmektedir. Kamu güvenliğinde ise acil durum müdahale ekipleri, olay yerine hızlı ve doğru bir şekilde ulaşmak için CKS teknolojisini kullanmaktadır (Kvamme 1999).

CKS teknolojisi, internet ve mobil cihazlar ile entegrasyon sayesinde günlük hayatın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Akıllı telefonlar, taşıdıkları GPS alıcıları ile kullanıcılara anlık konum bilgisi sağlamaktadır. Ayrıca, otonom araçlar ve drone teknolojileri gibi gelişmeler, CKS'nin önemini ve kullanım alanlarını daha da artırmaktadır (Goodchild 2009).

Son yıllarda, çoklu uydu sistemlerinin (GNSS) entegrasyonu, CKS'nin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır. GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou gibi sistemlerin bir arada kullanımı, özellikle zorlu çevre koşullarında bile yüksek doğruluk sağlamaktadır (Li vd. 2015). Ayrıca, düşük maliyetli GNSS alıcılarının performans değerlendirmeleri, bu teknolojinin tarım, akıllı şehirler ve otonom araçlar gibi alanlarda yaygınlaşmasına olanak tanımaktadır (Radicioni vd. 2023).

Koordinat sistemlerinde referans noktaları, tüm ölçümler ve dönüşümler için sabit bir temel sağlamaktadır. En yaygın olarak kullanılan referans noktalar, Ekvator ve Başlangıç Meridyeni'dir (Prime Meridian). Ekvator, 0 derece enlemde yer alır ve dünyayı kuzey ve güney yarımkürelere bölmektedir. Başlangıç Meridyeni ise 0 derece boylamda bulunur ve dünyayı doğu ve batı yarımkürelere bölmektedir (Şekil 2.22.).



Şekil 2.22. Koordinat sistemleri için referans noktaları (Ünal 2012)

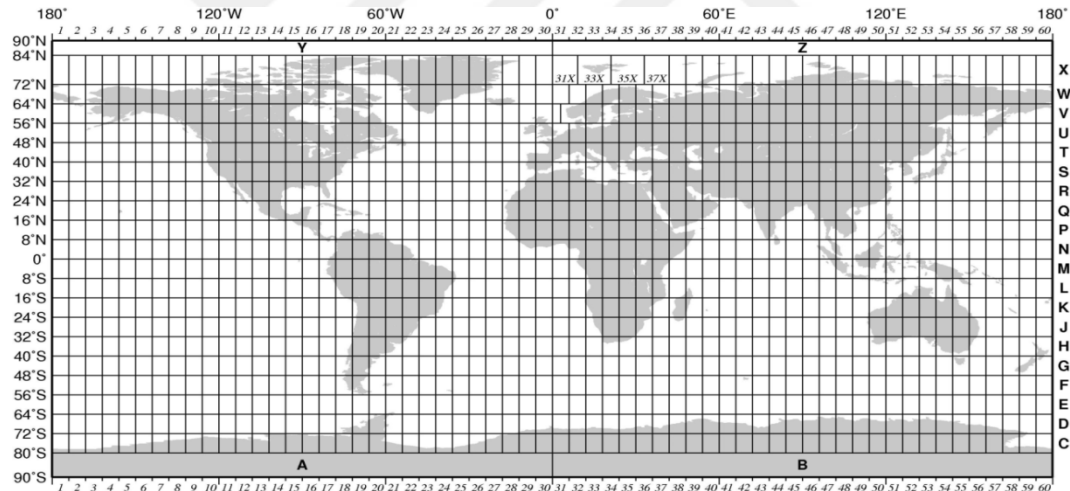
Enlem çizgileri, ekvatorun doğuya ve batıya doğru uzanan ve toplamda 180 adet halkayı içeren, ekvatora paralel çizgilerdir. Bu çizgiler, ekvatorun altında veya üstünde olmalarına göre sınıflandırılırlar. Ekvator 0°, Güney Kutbu 90° G ve Kuzey Kutbu 90° K olarak isimlendirilir. Diğer enlem çizgileri 0° ile 90° K ve 0° ile 90° G arasında belirlenir. Tüm enlem çizgileri arasındaki mesafe eşit olup, her biri yaklaşık 111 kilometre uzunluğundadır.

Boylam çizgileri, ekvatora dik olarak yerleştirilmiş ve Kuzey Kutbu'ndan Güney Kutbu'na uzanarak kutup noktalarında kesişen toplam 360 adet çizgiyi kapsar. Bu çizgiler, başlangıç meridyeni olarak kabul edilen Greenwich Meridyeninin doğusunda veya batısında yer alırlar. Boylam çizgileri 0° ile 180° Doğu ve 0° ile 180° Batı arasında belirlenir. Tüm boylam çizgileri arasında, yerel saat açısından dört dakikalık bir fark bulunmaktadır.

2.2.4.1. Universal transverse marcator (UTM)

Universal Transverse Mercator (UTM) koordinat sistemi, coğrafi noktaları derece-dakika-saniye yerine metre cinsinden ölçümlerle belirlemeyi sağlamaktadır. Bu sistem, GPS ve GIS gibi teknolojilerde geniş çapta kullanılan, konumları hassas bir şekilde saptayan bir yöntemdir. UTM, dünyayı 80° G ve 84° K enlemleri arasında 60 eşit bölgeye ayırır ve her bir bölge arasında 6° 'lık bir fark bulunmaktadır. Referans noktaları, her dilimin merkez meridyeni ve ekvator olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, bir noktanın UTM konumu, o noktanın bulunduğu dilimin başlangıç noktasından olan mesafesi (X) ve ekvatora olan mesafesi (Y) olarak ifade edilmektedir. UTM, düzlem geometrisi tekniklerinin kullanımını mümkün kılarak hesaplamaları kolaylaştırır ve bu sayede iki nokta arasındaki mesafe ve yön açısı kolaylıkla belirlenebilir.

Şekil 2.23'te UTM koordinat sistemi görülmektedir.



Şekil 2.23. UTM koordinat sistemi (Ünal 2012)

2.2.5. Navigasyon metodolojisi

Navigasyon metodolojisi, belirli bir alanda yön bulma ve hedefe ulaşma süreçlerini optimize eden stratejileri ve teknikleri içermektedir. Son on yılda yapılan araştırmalar, bu alandaki çeşitli yenilikçi yaklaşımları ve uygulamaları vurgulamaktadır. Örneğin, Parush (2015), konsept tasarımını takip eden ve kullanıcı araştırma teknikleri ile veri türlerine odaklanan bir metodoloji önermiştir. Bu yaklaşım, fonksiyonel parçaların belirlenmesi ve bunların fiziksel yerlere atanması ile navigasyon haritasının incelenmesini içermektedir. Lewandowicz vd. (2019), koridor eksenlerinin düğüm-ilişki yapısı metodolojisine dayalı olarak oluşturulmasını ve bu yapının, daha doğal yolların elde edilmesini sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu metodoloji, iç mekân

navigasyon modellerinin oluşturulmasında önemli avantajlar sunmaktadır. (Wang ve Li 2018), çoklu sensör verilerini birleştirerek, SINS/GPS/odometre entegre navigasyon sistemi için uyarlamalı bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu metodoloji, ölçüm sinyalindeki gürültü ve aykırı değerleri tespit etmek ve işlemek için yenilikçi bir yöntem sunmaktadır. Stateczny vd. (2019), su altı navigasyonu için 3D multibeam sonar verilerinin işlenmesiyle ilgili yeni bir metodoloji geliştirmişlerdir. Bu yöntem, büyük veri kümelerini adım adım işleyerek, ayrıntılı 3D modeller ve izolin haritalar oluşturmayı amaçlamaktadır. Son olarak, Varlamis vd. (2021), gemi rotalama ve programlama için AIS verilerini kullanarak, çoklu gemi izlerinden elde edilen navigasyon ağları oluşturma metodolojisi sunmuşlardır. Bu yöntem, deniz trafiği için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Navigasyon, bir kişi veya araç için bir başlangıç noktasından başka bir noktaya hareketin kontrolü ve yönlendirilmesi sürecidir. Bu süreç, denizde rota belirleme, havada uçuş güzergahı izleme ve karada yön bulmayı içermektedir. Navigasyonun farklı uygulama alanları vardır ve bu alanlara göre gemi, uçak, araç veya kişisel navigasyon gibi çeşitli şekillerde isimlendirilir. Her biri kendi uygulama ortamlarına özgü kısıtlamalara sahip olan bu yöntemler, temelde yol bulma amacı güder ve bu amacı karşılamaya yönelik olarak geliştirilmiştir. Navigasyon süreçlerinin, farklı ulaşım modlarına göre özelleşmiş teknikler ve araçlar kullanılmasını gerektiren bu çeşitliliği, uygulama alanının gereksinimlerine göre şekillenmektedir (Ünal 2012) .

Navigasyon, farklı uygulama alanlarında kullanılsa da temel bazı gereksinimlere ihtiyaç duymaktadır. Bu gereksinimler şu şekilde sıralanabilir:

- Başlangıç noktasının lokasyonu,
- Kullanıcının anlık lokasyonu,
- Varış noktasının lokasyonu,
- İşlem esnasında kullanılacak yöntem(ler)
- Uygulanacak yönteme bağlı olarak gerçekleştirilecek işlemler (Nissen vd. 2003).

Araç navigasyon sistemlerinin yukarıda sıralanan ihtiyaçlar doğrultusunda etkin bir şekilde işlemesi için dört ana parçadan meydana gelen bir yapı kurulmalıdır. Bunlar;

- Sistem içinde kullanım koşullarına göre seçilecek bir konum belirleme teknolojisi (örneğin GPS),
- Kullanılan uygun konum belirleme sistemi tarafından sağlanan verilerin entegre edileceği ve sistemin etkin çalışmasını destekleyecek geometrik ve geometrik olmayan verilerin işleneceği bir yapı,
- Tüm verileri işleyerek yön bulma için gereken analiz ve hesaplamaları gerçekleştirecek ve elde edilen bilgilerle navigasyon sağlayacak bir yazılım,
- Bu süreçlerin yürütüleceği araç içi donanım şeklindedir.

Araç navigasyon uygulamaları, iki ana kategoride incelenebilir: birincisi, sürücü destekli otomatik navigasyon sistemleri; ikincisi ise sürücü desteği gerektirmeyen otonom navigasyon sistemleridir. Sürücü destekli otomatik sistemlerde, operatör aracın performansını sürekli olarak gözlemler ve zorlu koşullar altında manuel müdahale ile aracı yönlendirmektedir. Sürücü destekli otomatik sistemler, operatörün üzerindeki yükü hafifletirler, verimliliği ve güvenliği artırır ve uzun süreli yüksek performans sağlarlar.

Bu bağlamda, Gerrish vd. (1997) tarafından yapılan çalışmalar, sürücü destekli otomatik sistemlerin, operatör üzerindeki baskı ve stresi nasıl azalttığını ve genel sistem verimliliğini nasıl artırdığını detaylandırmaktadır.

Sürücüsüz otonom sistemler, yüklü görev ve koordinat bilgilerine dayanarak kendi başlarına hareket edebilme kapasitesine sahiptirler. Bu tür sistemler, otomatik sistemlere kıyasla maliyet açısından daha yüksek olabilir ancak, birçok uygulamada sağladıkları etkinlik ve bağımsızlık nedeniyle tercih edilmektedirler. Otomatik sistemler daha uygun maliyetli olmasına rağmen, otonom sistemlerin sunduğu avantajlar, özellikle karmaşık veya müdahale gerektirmeyen ortamlarda, bu ek maliyeti haklı çıkarmaktadır. Bu bağlamda, bu tez çalışmasında otonom hareket kabiliyetine sahip bir araç geliştirilerek otonom sistemlerin potansiyelini daha da ileriye taşımak amaçlanmıştır.

Otonom araçlarda üç ana donanım kategorisi vardır: konum sensörleri, araç kontrolcüler ve hareketlendiriciler. Konum sensörleri (GPS, pusula vb.), araçların önceden belirlenen bir rota üzerinde doğru konumlandırılmasını sağlarlar. Araç kontrolcüler ise, aracın hareket etmesi, durması ve dönüş yapması için gerekli olan komutları veren elektronik ve yazılımsal birimlerdir. Hareketlendiriciler, aracın motorlarını ve bu motorlara bağlı hidrolik ya da elektronik bileşenleri içerir ve aracın fiziksel hareketini sağlarlar. Otonom araçların yönlendirilmesi sürecinde, araç kontrolcüler, konum sensörlerinden aldıkları bilgileri işleyerek aracın hareket planını oluşturur ve bu plan doğrultusunda hareketlendiricilere gerekli komutları iletirler, böylece aracın uygun şekilde hareket etmesi ve yönlendirilmesi sağlanmaktadır. Bu sistematik yaklaşım, aracın etkili bir şekilde navigasyon yapabilmesini ve çeşitli ortamlarda bağımsız olarak çalışabilmesini mümkün kılmaktadır.

Hassas tarım teknolojilerinin gelişmesi ile, tarım makinelerinin otomatik olarak yönlendirilmesi konusunda çeşitli teknikler üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu yönlendirme süreci, makinelerin önceden belirlenen bir rota üzerinden otomatik olarak hareket etmelerini sağlamayı amaçlar. Kullanılan rehberlik sistemleri, aracın duruş yönünü tespit eder ve hedefe ulaşmak için gereken dümenleme komutlarını belirlerler. Tarım makinelerinde, ultrasonik, mekanik, optik ve radyo tabanlı sistemler gibi çeşitli rehberlik teknolojileri kullanılmaktadır. Bu sistemler, araçların istikamet (heading) ve kertz (azimuth) açıları ile mesafeyi hesaplayarak, doğru yönlendirme yapılmasını sağlarlar. İstikamet açısı, aracın merkez çizgisiyle manyetik kuzey arasındaki açıyı; azimuth açısı, manyetik kuzey ile hedef nokta arasındaki açıyı ifade etmektedir. Mesafe ise, bulunan noktadan hedef noktaya olan doğrudan uzaklığı göstermektedir. Bu açısal parametreler üzerinde yapılan matematiksel hesaplamalar, aracın sağa veya sola dönüşlerini belirlemede kullanılmaktadır (Ünal 2012).

Otonom sistemler, tarımın daha verimli ve doğru bir şekilde yapılmasını sağlayarak, kaynakların daha etkin kullanımına olanak tanımaktadır. Otomatik yönlendirme teknolojileri sayesinde, tarım araçları daha az insan müdahalesi ile daha kesin ve düzenli bir biçimde çalışabilir, bu da üretim maliyetlerini düşürür ve tarım ürünlerinin kalitesini artırabilir.

2.3. Coğrafi bilgi sistemleri ve ArcGIS

CBS, coğrafi verilerin toplanması, saklanması, yönetilmesi, analizi ve

görselleştirilmesi için kullanılan bilgisayar tabanlı sistemdir. CBS, farklı kaynaklardan coğrafi bilgileri toplar, düzenler ve bu bilgileri analiz ederek karar verme süreçlerine katkıda bulunmaktadır (Tomaszewski 2020). CBS'nin temel işlevleri arasında veri girişi, depolama, sorgulama, analiz ve görselleştirme bulunmaktadır. CBS, mekânsal verileri analiz etme yeteneği ile önemli bir araçtır. Gonzalez (2017), CBS'nin uzaktan algılama ve küresel navigasyon sistemleri ile etkileşimlerini inceleyerek, mekânsal verilerin karar verme süreçlerindeki rolünü artırdığını belirtmiştir. CBS'nin uygulama alanları oldukça geniştir. Örneğin, CBS yangın önleme destek sistemlerinde kullanılmakta ve sosyal ve organizasyonel analizler, mekânsal modelleme ve fonksiyonel tasarım gibi metodolojilerle entegre edilerek yangın ve kurtarma hizmetlerinde önemli katkılar sağlamaktadır (Dean vd. 2017). Büyük veri analitiği ile birleştiğinde, mekânsal veri setlerinin yönetimi ve analizi için güçlü bir araç haline gelmektedir. Usmani vd. (2020), CBS ve büyük mekânsal veri uygulamalarını incelemişler ve bu alandaki zorlukları ve açık sorunları tartışmışlardır. CBS'nin eğitim alanında da önemli kullanımları vardır. Gilblom ve Sang (2020), eğitim araştırmalarında CBS kullanımını ve coğrafi konumun araştırma verilerine nasıl entegre edileceğini adım adım açıklamışlardır. Bu yöntem, araştırmacıların mekânsal ve mekânsal olmayan değişkenleri görselleştirerek daha derin analizler yapmalarına olanak tanımaktadır. CBS, çeşitli endüstrilerde ve kamu hizmetlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, Shi vd. (2013), CBS'nin doğal ve sosyal bilimler, kamu güvenliği, acil durum müdahalesi, mekânsal zekâ analitiği ve askeri operasyonlar gibi alanlarda nasıl kullanıldığını incelemişlerdir.

CBS, coğrafi verilerin yönetimi, analizi ve görselleştirilmesi için çok yönlü ve güçlü araçlardır. Çeşitli disiplinlerde karar verme süreçlerini desteklemekte ve geniş uygulama yelpazesi ile dikkat çekmektedir.

ArcGIS, ESRI tarafından geliştirilen kapsamlı ve entegre bir yazılımdır. CBS için harita oluşturma, coğrafi veri toplama, analiz etme, paylaşma ve yönetme işlevlerini sunmaktadır. ArcGIS, gerçek dünyayı modellemek için coğrafi bilgi modelleri, coğrafi bilgileri dosya ve veri tabanlarında saklama, yönetme bileşenleri, coğrafi bilgileri oluşturan, düzenleyen ve analiz eden uygulamalar ile ağ üzerinden yazılım istemcilerine veri ve fonksiyonlar sağlayan web servisleri gibi dört ana yazılım parçasından oluşmaktadır.

ArcGIS, Python programlama dili ile entegre çalışabilmektedir. Tateosian (2015), ArcToolbox araçlarının Python dilinde yazılan arcpy paketi ile nasıl kullanılabileceğini ve bu araçların CBS analizlerinde nasıl otomatikleştirilebileceğini detaylı olarak incelemiştir. Bu entegrasyon, CBS analistlerine esnek bir çalışma ortamı sunmakta ve analiz süreçlerini optimize etmektedir. ArcGIS'in çevresel ve su sorunlarına yönelik kullanımı da oldukça yaygındır. Bajjali (2018), ArcGIS'in veri edinimi, koordinat sistemleri ve projeksiyonlar, geodatabase oluşturma, veri düzenleme ve topoloji gibi temel işlevlerinin yanı sıra, mekânsal interpolasyon ve hidrografik analiz gibi daha ileri düzeydeki uygulamalarını ele almıştır. Singh ve Bawa (2016), büyük veri analizi için MapReduce tekniği ile ArcGIS'i birleştirerek mekânsal veri işleme süreçlerini hızlandırmayı başarmışlardır. Bu çalışma, paralel işlem çerçevesi ve ArcGIS'in uzmanlaşmış CBS yazılımı aracılığıyla büyük veri kümelerinin verimli bir şekilde işlenebileceğini göstermiştir.

Liu ve Yu (2022), ArcGIS kullanarak şehirlerdeki kamu alanlarının 3D tasarım

modellerini oluşturmuş ve bu modellerin kamu alanlarının değerlendirilmesi ve optimize edilmesi için nasıl kullanılabileceğini incelemiştir. Bu çalışmalar, ArcGIS'in şehir planlama ve kamu hizmetleri yönetiminde önemli bir araç olduğunu göstermektedir.

ArcGIS, coğrafi verilerin yönetimi, analizi ve görselleştirilmesi için çok yönlü ve güçlü bir yazılımdır. Farklı disiplinlerdeki uygulamaları ile ArcGIS, mühendislikten çevresel analizlere, şehir planlamasından web tabanlı harita hizmetlerine kadar geniş bir yelpazede kullanılmaktadır.

2.3.1. Harita görüntülerini coğrafi referanslama ve sayısallaştırma

Harita görüntülerini coğrafi referanslama ve sayısallaştırma süreçleri, mekânsal verilerin analiz edilebilmesi ve farklı veri kaynakları ile entegre edilebilmesi için kritik öneme sahiptir. Bu süreçler, CBS'nin temel işlevlerinden biridir.

Coğrafi referanslama, harita görüntülerinin belirli bir koordinat sistemine oturtulması sürecidir. Coğrafi referanslama, harita üzerinde belirlenen referans noktalarının gerçek dünya koordinatları ile eşleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu süreç hem eski analog haritaların hem de yeni dijital haritaların coğrafi bilgi sistemlerinde kullanılabilir hale getirilmesi için kritik öneme sahiptir (Burt vd. 2020).

Coğrafi referanslama sürecinde, harita üzerinde kolayca tanımlanabilir ve gerçek dünya koordinatları bilinen noktalar seçilir. Bu noktalar köprüler, kavşaklar veya bina köşeleri gibi belirgin yapılar olabilir. Belirlenen referans noktalarının harita üzerindeki koordinatları, gerçek dünya koordinatları ile eşleştirilir. Bu işlem genellikle bir koordinat dönüşüm algoritması kullanılarak yapılır (Sisman ve Sisman 2017). Koordinat dönüşüm işlemi tamamlandıktan sonra, harita görüntüsü yeni koordinat sistemine göre yeniden hizalanır ve bu yeni sistemdeki yerini alır.

Sayısallaştırma, analog harita verilerinin dijital formata dönüştürülmesi sürecidir. Bu süreç, harita üzerindeki bilgilerin dijital ortamda analiz edilebilmesi ve işlenebilmesi için gereklidir. Sayısallaştırma işlemi, harita üzerindeki çizgiler, noktalar ve alanlar gibi coğrafi özelliklerin dijital koordinatlara dönüştürülmesi ile gerçekleştirilir (Milleville vd. 2022).

Sayısallaştırma süreci, analog haritaların yüksek çözünürlüklü tarayıcılar kullanılarak dijital görüntüler haline getirilmesi ile başlamaktadır. Tarama işlemi sonrasında elde edilen dijital görüntüler, yukarıda açıklanan coğrafi referanslama süreci ile koordinat sistemine oturtulur. Harita üzerindeki çizgiler, noktalar ve alanlar sayısallaştırma yazılımları kullanılarak dijital verilere dönüştürülür. Bu süreç, manuel olarak veya otomatikleştirilmiş yazılımlar ile gerçekleştirilebilir (Blaser vd. 2020). Oluşturulan dijital verilerin doğruluğu kontrol edilir ve gerekli düzeltmeler yapılır.

Modern teknolojiler, coğrafi referanslama ve sayısallaştırma süreçlerini büyük ölçüde iyileştirmiştir. Örneğin, Burt vd. (2020) tarafından geliştirilen desen eşleme ve mekânsal hesaplama yöntemleri, haritaların otomatik olarak coğrafi referanslanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemler, kullanıcı müdahalesi olmadan harita sınırlarını bulmak ve yer kontrol noktalarını belirlemek için kullanılmıştır.

Sisman ve Sisman (2017) tarafından yapılan bir diğer çalışma, Türkiye'de kadastro haritalarının coğrafi referanslanması için kullanılan faktörlerin optimizasyonunu araştırmıştır. Bu çalışma, tarama çözünürlüğü, harita ölçeği ve ortak nokta sayısının coğrafi referanslama doğruluğu üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Luft ve Schiewe (2021) ise tarihsel topografik haritaların otomatik içerik tabanlı coğrafi referanslanmasını ele almışlardır. Bu yöntem, haritaları çevrimiçi referans verileri ile eşleştirerek, harita simgelerinin otomatik olarak konumlandırılmasını sağlamaktadır.

Blaser vd. (2020), yüksek performanslı görüntü tabanlı mobil haritalama sistemi ve yeni coğrafi referanslama yöntemlerini kullanarak, ormanlık alanlar ve şehir merkezleri gibi zorlu dış mekân konumlarında yüksek doğrulukta veri toplama üzerine çalışmalar yapmışlardır.

Turner vd. (2014), mikro insansız hava araçları (UAV) ile ultra yüksek çözünürlüklü görüntüler toplayarak doğrudan coğrafi referanslama tekniklerini geliştirmişlerdir. Bu yöntem, yer kontrol noktalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, görüntülerin hava çerçevesindeki pozisyonunu GPS verileri ile senkronize etmektedir.

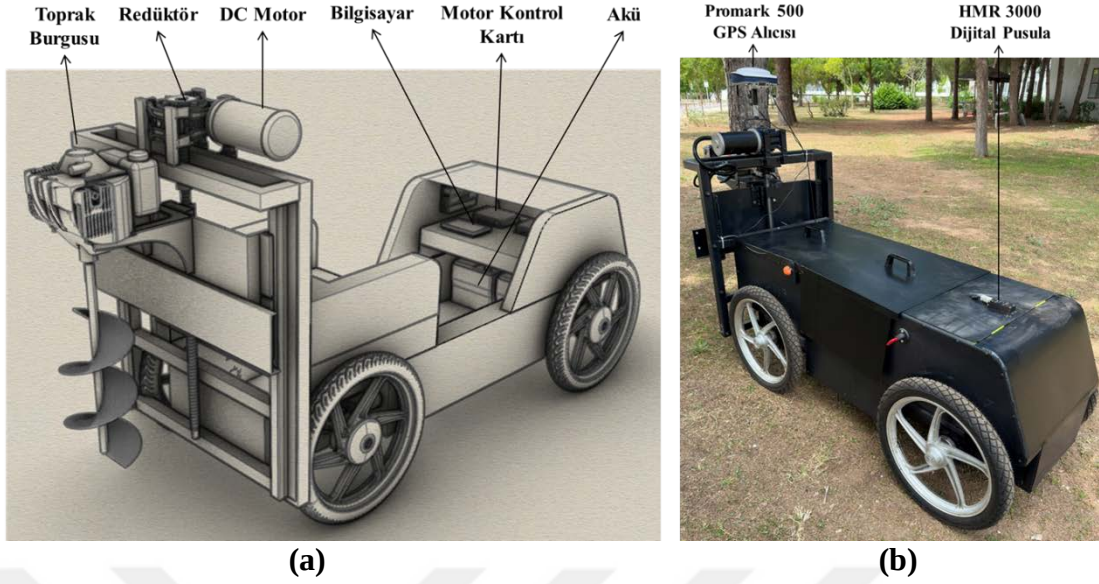
Bu çalışmalar, coğrafi referanslama ve sayısallaştırma süreçlerinin optimize edilmesi ve otomatikleştirilmesi konusunda önemli ilerlemeler sağlamıştır. Bu yöntemler, coğrafi bilgi sistemlerinin daha verimli kullanılmasını ve mekânsal analizlerin doğruluğunu artırmaktadır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Materyal

Bu çalışmada, noktadan noktaya otonom hareket edebilen ve gerektiğinde bir joystick yardımıyla manuel olarak kontrol edilebilen bir mobil robot aracılığıyla çukur açma (toprak burgu) sistemi geliştirilmiştir. Robotun üzerine monte edilen endüstriyel bilgisayar sayesinde, sistemdeki tüm elektronik cihazlar yönetilmiş ve aralarındaki iletişim sağlanmıştır. Motorların çalıştırılması, kontrol edilmesi, GPS verilerinin analiz edilmesi ve navigasyonun gerçekleştirilmesi için özel bir yazılım geliştirilmiştir. Bu yazılım, platformun hareket sisteminde kullanılmak üzere dört adet DC motorun kontrolünü mümkün kılmaktadır. DC motorlar, motor kontrol kartı aracılığıyla endüstriyel bir bilgisayara bağlanabilmektedir. Ayrıca, mobil robotun üzerine toprak burgusu yerleştirilmesine olanak tanıyan bir yazılım da geliştirilmiştir. Toprak burgu sistemi, 500 watt gücünde beşinci bir motorla çalıştırılmaktadır. Motorların bilgisayara bağlanabilmesi sayesinde, mobil robot internet üzerinden uzaktan izlenip kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen CBS tabanlı çukur açma robotunun meyve bahçesinde otonom olarak görev yapabilmesi için çalışma alanına ait Landsat uydusundan alınan dijital görüntü verileri kullanılmıştır. Robotun çukur açacağı noktaların koordinatları, dijital uydu görüntüsü üzerinde ArcMap uygulaması kullanılarak belirlenmiştir ve bir görev dosyası oluşturulmuştur. Oluşturulan görev dosyası, mobil robotun üzerindeki bilgisayara yüklenmiştir. Mobil robotun çalışma alanında otonom olarak hareket edebilmesi için bir navigasyon programı geliştirilmiştir. Mobil robot, navigasyon programını kullanarak görev dosyasındaki koordinatlara göre çukurların yerlerine otonom olarak yönlendirilmiş ve çukurları açmıştır. CBS tabanlı Otonom Burgu Robotu'nun katı modeli ve fotoğrafına Şekil 3.1'a ve b'de yer verilerek üzerlerinde kullanılan donanımlar gösterilmiştir. Çalışmanın temel amacı, bahçedeki fidan çukurlarının coğrafi konumlarını belirlemek için ArcGIS yazılımını kullanmak ve otonom mobil robot ile toprak burgu makinesinin geliştirilmesi ve uyarlanmasını sağlamaktır. Sistemde dört ana yapı bulunmaktadır:

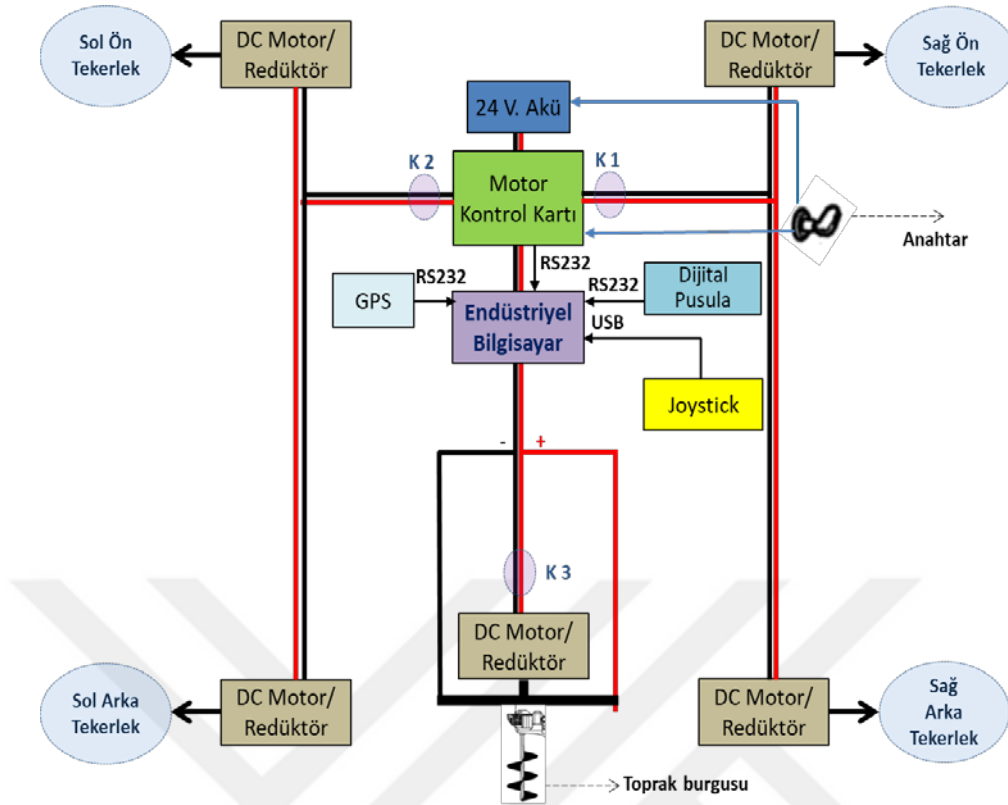
- Otonom mobil robot ve navigasyon algoritmasının geliştirilmesi: Dört tekerlekli otonom robot, dört adet DC motor tarafından yönlendirilmektedir. Diferansiyel direksiyon mekanizması bulunmaktadır. Bir noktadan diğerine manuel veya otonom olarak manevra yapılabilir. Bir noktadan diğerine manuel veya otonom olarak manevra yapılabilir.
- Otonom mobil robot ve toprak burgu makinesinin uyarlanması: Toprak burgulama makinesi, çukur açma görevine yönelik özel olarak tasarlanmış bir çözümdür; geliştirdiğimiz otonom mobil robotla birleştirilmiştir.
- Dijital harita üzerinde dikim çukurlarının açılma noktalarının belirlenmesi: Verilerin işlenmesi ve birleştirilmesi, detaylı analizlerin gerçekleştirilmesi, prosedürel işlemlerin modellenmesi ve otomatikleştirilmesi için ArcGIS yazılımı kullanılarak dikim çukurlarının açılma noktaları belirlenmiştir.
- Tasarlanan sistemin yazılım çözümleri: Yazılım, mobil robotun otonom navigasyonunu ve burgu sisteminin çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. CBS tabanlı Otonom Toprak Burgu Robotunun **a)** katı modeli; **b)** fotoğrafı

3.1.1. Mobil robot tasarımı ve kinematik modeli

Dört tekerlekli tarım mobil robotu hem manuel hem de otomatik olarak manevra yapabilme yeteneğine sahiptir. Mobil robotun ana çatısı, 140 mm genişliğinde NPU profil kullanılarak oluşturulmuştur. Robotun kaporta kısmında ise ağırlığı azaltmak amacıyla hafif malzemeler tercih edilmiştir. Bu robotun, saha koşullarında etkili bir şekilde yönlendirilebilmesi için 2.50×17 ölçülerinde dört adet lastik tekerlek ile donatılmıştır. Mobil robotun her tekerleği, robotun çatısına yerleştirilen dört ayrı motor-redüktör seti ile bağlantılıdır. Bu düzenleme sayesinde motorlar tarafından üretilen tork, tekerleklerle tamamen aktarılmıştır. Ayrıca, bu bağlantı her tekerleğin bağımsız olarak hareket edebilmesine olanak tanımıştır. Saha çalışmalarında, makinenin çekiş gücü ve genel sürüş performansı büyük ölçüde tekerleklerin özelliklerine bağlıdır. Ağır tarım makinelerinin toprak sıkışmasını azaltmak için geniş tekerleklerin kullanılması gerektiği bilinmektedir; ancak meyve bahçeleri gibi dar sıralı alanlarda dar tekerlekler tercih edilmelidir. Geniş tekerlekler kullanıldığında, fidanlara basınç uygulanmakta ve tekerlek genişliği arttıkça aracın torku da artmaktadır. Tarımsal mobil robotların giderek artan kullanımı, birçok yeni zorlukları da beraberinde getirmiştir. Bu zorluklardan biri, hareket ve görev planlaması için yeterli miktarda enerji kaynağı, özellikle de batarya gereksinimidir. Enerji yetersizliği, uzun süreli veya zor görevlerin istenilen şekilde tamamlanmasını engelleyebilmektedir. Mobil robotun enerjisini verimli kullanması, artan enerji talebi nedeniyle hayati önem taşımaktadır. Geliştirilen mobil robot yaklaşık 150 kg ağırlığında olup hafif bir araçtır. Geniş tekerlekler hareket gerektirdiği fazla tork nedeniyle daha fazla güç tüketmektedir. Bu, DC motorlarının aküden daha fazla güç çekmesine ve dolayısıyla robotun çalışma süresinin kısalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden, bataryanın ömrünü uzatmak amacıyla geniş tekerlekler yerine ince tekerlekler kullanılmıştır. Geliştirilen sisteme ait blok şeması Şekil 3.2.'de görülmektedir.

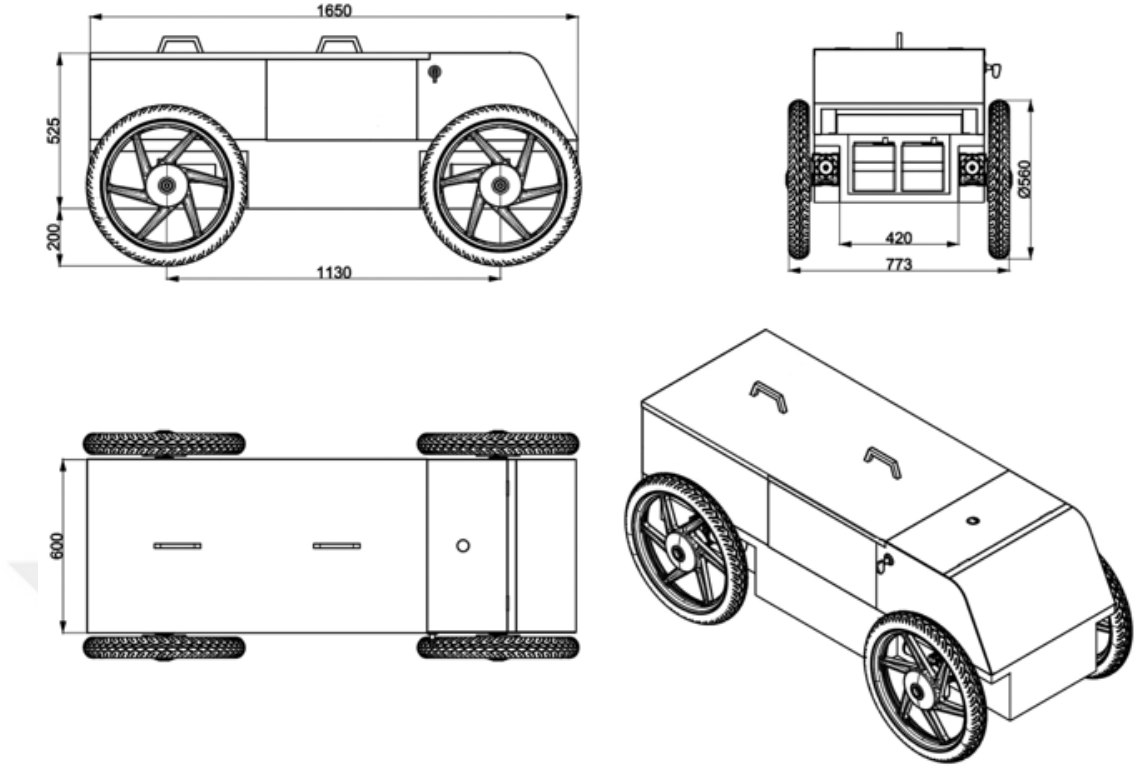


Şekil 3.2. Mobil robot ve burgusu sistemi blok şeması

3.1.2. Mobil robot hareket sistemi

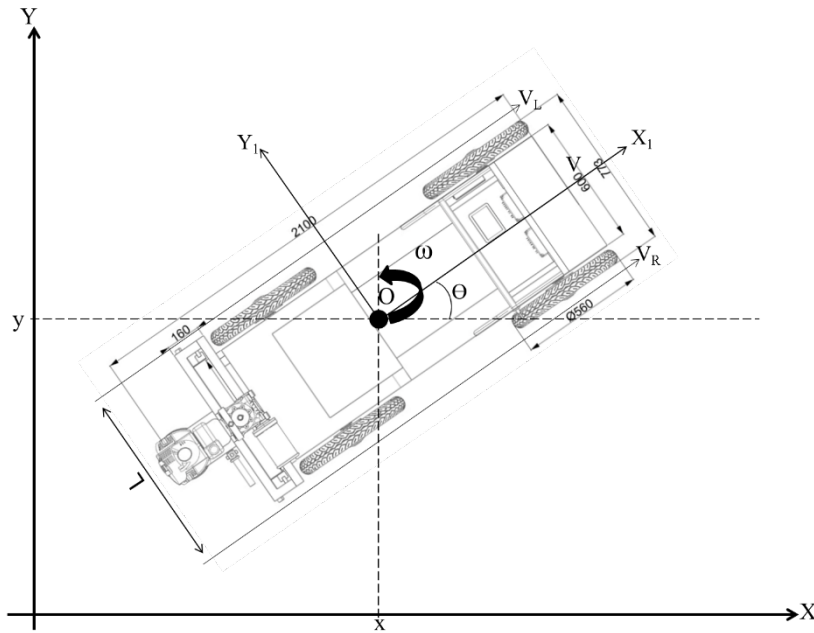
Mobil robotun hareket mekanizması, diferansiyel sürüş sistemidir. Robotun sağ ön motoru sağ arka motora, sol ön motoru ise sol arka motora seri olarak bağlanmıştır. Bu konfigürasyon, sağ ve sol taraftaki motorların diferansiyel yöntemle çalışmasını sağlamaktadır ve böylece robot diferansiyel sürüş sisteminden faydalanmaktadır. Bu sistem sayesinde robotun sol ve sağ tekerlekleri farklı hızlarda hareket edebilmektedir. Mobil robotun düz bir çizgide ilerleyebilmesi için tüm tekerlek hızlarının eşitlenmesi gerekmektedir. Farklı hızlarda hareket eden tekerlekler, robotun daha yavaş olan tekerleğinin bulunduğu yöne dönmesine neden olmaktadır. Ayrıca, mobil robotun sol ve sağ tekerlekleri birbirine ters yönde döndürülerek yerinde 360 derece dönüş yapması sağlanmaktadır.

Yönlendirme için, iki RoboteQ FDC3260 model 3 kanallı DC motor kontrol ünitesi kullanılmıştır. Robot ve ek donanımlar, iki adet 12V, 72 Ah kapasiteli, şarj edilebilir, bakım gerektirmeyen akü ile çalıştırılmıştır ve bu aküler, motorlara 24 V sağlayacak şekilde seri bağlanmıştır. Mobil robotun teknik detayları ve çizimleri Şekil 3.3. 'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Mobil robotun teknik çizimi.

Geliştirilen dört tekerlekli diferansiyel sürüş sistemine sahip mobil robotun, iki boyutlu bir düzlemdeki görünümü şekil 3.4.'te yer almaktadır. Bu şekilde, robotun yerel koordinat sistemi (x_1 , O , y_1) görülmektedir. Burada, x_1 robotun ilerleme yönünü, O robotun merkez noktasını ve y_1 ise robotun yanal yönünü ifade etmektedir.



Şekil 3.4. Geliştirilen diferansiyel robotun kinematik modeli

Holonomik olmayan 4WD mobil robot için diferansiyel hareket denklemleri (3.1) ve (3.2) bağıntılarındaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$P = \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ \frac{r}{2} & -\frac{r}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Burada mobil robotun konumu, hızı ve açısal hızı sırasıyla $((x, y, \theta), v, \omega)$ ile temsil edilir ve bunların türevleri sırasıyla $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ ile gösterilir. Burada mobil robotun konumu, hızı ve açısal hızı sırasıyla $((x, y, \theta), v, \omega)$ ile temsil edilir ve bunların türevleri sırasıyla $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta})$ ile gösterilir. Verilen formüle göre $v_R = v_L$ ve $\omega = 0$ olduğunda robot sabit bir hızla düz bir şekilde hareket eder. Eğer $v_R = [-v]_L$ ise kendi merkezi etrafında dönecektir. $v_R \neq v_L$ olduğunda robot belirli bir yarıçapa (ρ) sahip kavisli bir yol izler. Bu eğrinin yarıçapını hesaplamaya yönelik formül denklem (3.3)'te ayrıntılı olarak açıklanmıştır:

$$\rho = \frac{v}{\omega} = \frac{L * (v_L + v_R)}{2 * (v_L - v_R)} \quad (3.3)$$

Yukarıdaki denklemler incelendikten sonra holonomik olmayan mobil robotun kinematik denklemi (3.4) bağıntısında gösterildiği gibi formüle edilebilir:

$$P = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} * \cos\theta & \frac{r}{2} * \cos\theta \\ \frac{r}{2} * \sin\theta & \frac{r}{2} * \sin\theta \\ \frac{r}{L} & \frac{-r}{L} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_R \\ v_L \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.1.3. DC motor ve redüktör

Mobil robotun güç ihtiyacı, dört adet 24 V, 0,25 kW, 1440 rpm'lik DC motorlar tarafından karşılanmaktadır ve motorların toplam çıkış gücü 1 kW'tır. Dört tekerlek arasındaki bu güç dağıtımı, mobil robotun, aküyü aşırı tüketmeden çekiş gücü sağlamasına olanak tanımaktadır. Bu motorlar, her bir tekerleğe bağlı 1:10 redüksiyon oranına sahip dişli kutuları aracılığıyla güç aktarımı yapmaktadırlar. Bu düzenleme, tüm tekerleklerin motorlardan üretilen maksimum torku almasını sağlamaktadır. Redüktörlerin tork değeri 16.58 Nm, şaft torku ise 34.99 Nm'dir. Robotun maksimum hızı saatte 15.2 kilometre olup, toplam ağırlığı batarya ve diğer sistemler dahil yaklaşık 150 kg'dır.

Şekil 3.5.'te kullanılan DC motor ve redüktör görülmektedir.



Şekil 3.5. DC motor ve redüktör

3.1.4. Motor kontrol ünitesi

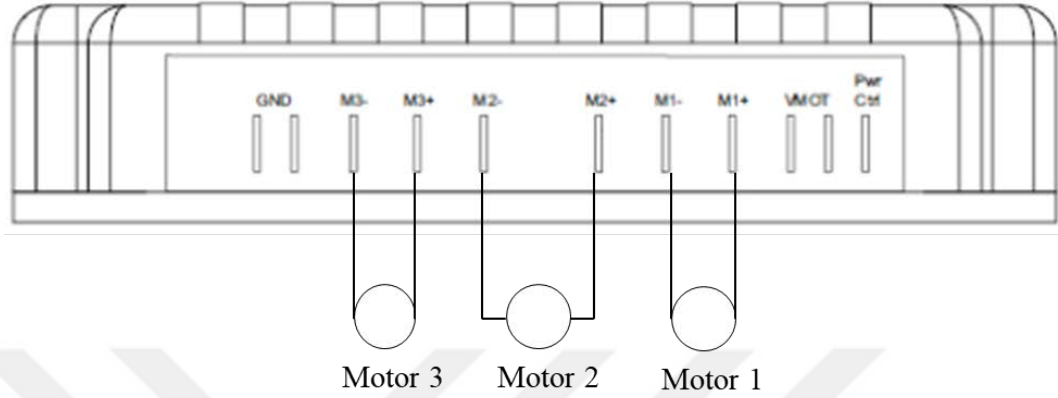
Sistemdeki DC motorların yönü ve çalışma hızı, Roboteq FDC3260 (Roboteq Inc., Arizona, USA) motor kontrol kartı ile yönetilebilmektedir. Bu kontrol kartı Şekil 3.6'da görüldüğü gibi üç kanala sahiptir. Motor kontrol ünitesi, RS232 iletişim formatını kullanarak seri port aracılığıyla endüstriyel bilgisayara bağlanmaktadır. Bu bağlantı sayesinde, endüstriyel bilgisayar içinde yüklü olan yazılım aracılığıyla kontrol ünitesine motor çalışma verileri gönderilmektedir.



Şekil 3.6. Roboteq FDC3260 marka motor kontrol ünitesi

Motor hızlarının denetimi ve ayarlanması, Darbe Genlik Modülasyonu (PWM - Pulse Width Modulation) yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. Ayarlanabilir bir doğru gerilim kullanılarak doğru akım motorlarının hızları kontrol edilebilmektedir. Motoru belirli bir hızda çalıştırabilmek için PWM yöntemi ile belirli aralıklarda motora darbe

sinyalleri gönderilerek enerji sağlanmaktadır. Motorun enerjili kalma süresini artırmak veya azaltmak için darbe sinyallerinin genliği ayarlanmaktadır. Bu şekilde motorun çalışma hızını kontrol etmek mümkün olmaktadır. Motorların ileri veya geri yönde dönmesi, uygulanan akımın yönünü değiştirerek sağlanmaktadır. Kullanılan motor kontrol ünitesinin blok şeması Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. FDC3260 Motor kontrol ünitesi blok şeması motor ve güç bağlantıları

RoboteQ FDC3260, yüksek performanslı elektrikli araç uygulamaları için özel olarak tasarlanmış ileri düzey bir motor kontrol kartıdır. Bu kontrol kartı, üç adede kadar fırçalı veya fırçasız DC motoru destekleyerek çok motorlu yapılandırmalar için esneklik sağlamaktadır. Her kanal için 60V ve 60A'ya kadar güç yönetimi yapabilen FDC3260, zorlu sürüş uygulamaları için gerekli olan yüksek güç seviyelerini yönetebilmektedir. FDC3260, analog, dijital ve darbe genişlik modülasyonu (PWM) gibi çeşitli giriş ve çıkışlara ek olarak, RS232, USB ve CAN bus gibi iletişim arayüzleri sunarak güçlü ve çok yönlü iletişim seçenekleri sağlamaktadır. Kullanıcıların kontrol mantığını belirli gereksinimlere göre özelleştirmelerine olanak tanıyan betik yazma yeteneği, bu kontrol kartının özel otomasyon projeleri ve robotik uygulamalarında kullanımını artırmaktadır. Ayrıca, FDC3260, acil durdurma, voltaj ve sıcaklık izleme ile arıza tespiti gibi gelişmiş güvenlik mekanizmaları içermektedir, bu da çeşitli koşullar altında güvenli çalışma sağlamaktadır.

Projede kullanılan motor kontrol ünitesinin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Motor kontrol ünitesinin teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
İletişim Modları	USB, RS323, RS485, 0-5V Analog veya Pulse (RC radyo), 1Mbit/s'e kadar CAN bus arabirimi ¹

¹(Devamı Arkada)

Otomatik Geçiş	Kullanıcı tanımlı önceliğe göre Serial, USB, CAN, Analog veya Pulse arasında otomatik geçiş yapar
Motor Sürücüler	Her biri 60A'ya kadar üç fırçalı DC motor için dahili çift 3 fazlı yüksek güçlü sürücüler
Sıcaklık Sensörü Desteği	10 KOhm NTC sıcaklık sensörlerini destekler (harici 10 KOhm çekme direnci gerekir)
Motor Kontrolü	Tam ileri ve geri motor kontrolü. Dört çeyrek operasyon. Yenilenmeyi destekler.
Güç Kaynağı	Tek bir 10V-60V kaynaktan çalışır
Güvenlik	Kısa devre koruması, aşırı gerilim ve düşük gerilim koruması
Akım Limiti	Motor başına maksimum 60A
Kodlayıcılar	Üç dörtlü kodlayıcı için özel bağlantı noktası
Girişler	Komut/geri bildirim için maksimum sekiz analog giriş, sekiz adede kadar Darbe Uzunluğu, Deadman Switch, Limit Switch, Acil durdurma veya kullanıcı girişleri olarak kullanım için 10'a kadar Dijital Giriş
Çıkışlar	Dört genel amaçlı 24V, 1.5A çıkış
Yapılandırma Seçenekleri	Pulse ve Analog modlarda seçilebilir min, max, merkez ve ölü bant, Her komut girişi için seçilebilir üstel katsayılar
Kontrol Modları	Açık veya kapalı döngü hız, kapalı döngü pozisyon kontrolü, tork modu, PID kontrol döngüsü
Ek Özellikler	Dahili pil voltajı ve sıcaklık sensörleri, isteğe bağlı yedek güç girişi, harici mikrobilgisayar veya anahtar ile kontrolcüyü açıp kapatabilen güç kontrol kablosu, motorlar durduğunda çıkış aşamasında tüketim yok, düzenlenmiş 5V çıkış, her motor için ayrı programlanabilir ivmelenme ve yavaşlama, ultra-verimli MOSFETler, kısa devre, aşırı voltaj, düşük voltaj, aşırı ısınma korumaları, tanılayıcı LED, IP40 derecesi
Fiziksel Özellikler	5.5" (139.7mm) x 5.5" (139.7mm) x 1.0" (25mm), -40° ile +85° C çalışma ortamı
Yazılım	PC yardımcı programı kullanılarak kolay yapılandırma, ayarlama ve izleme, İnternet üzerinden en son özelliklerle yazılım güncellemesi yapılabilir
Ağırlık	500g

3.1.5. Toprak burgusu

Çalışmada, geliştirilen mobil robotun arkası için tasarlanan dikey hareket mekanizmasına Palmera ZLAG520B toprak burgu makinesi (Remaş A.Ş., İstanbul, TR) akuple edilmiştir. Zorlu zemin delme işlemleri için tasarlanmış yüksek performanslı ve dayanıklı bir cihaz olduğundan dolayı özellikle sert ve sıkı topraklarda etkin bir şekilde çalışabilmiştir. Güçlü 51.7 cc motoru ve maksimum 8000 rpm devir hızı ile zorlayıcı delme işlemlerini kolaylıkla gerçekleştirmektedir. 2 zamanlı benzinli motoruyla çalışan Palmera ZLAG520B, 0.8 litrelik yakıt deposuna sahiptir, bu da uzun süreli kullanım imkânı sunmakta ve sık sık yakıt doldurma ihtiyacını azaltmaktadır. Otomatik durdurma ve aşırı ısınma koruma sistemleriyle donatılmış olan bu cihaz, kullanıcı güvenliğini en üst düzeyde tutmakta ve makinenin ömrünü uzatmaktadır. Çeşitli çaplarda burgu uçları ile uyumlu olan bu makine, 100 mm, 150 mm ve 200 mm çapında uç seçenekleri sunmaktadır. Maksimum çukur açma derinliği 0.9 metre olup, derin çukur açma gerektiren projelerde etkili bir performans sergilemektedir.

Çizelge 3.2’de toprak burgu makinesine ait teknik özellikler gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Toprak burgu makinesinin teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
Motor Hacmi	51.7 cm ³
Motor Gücü	2.1 hp
Maksimum Devir	8000 rpm
Yakıt Tipi	2 zamanlı benzinli motor
Yakıt Kapasitesi	0.8 litre
Delme Çapı	100 mm, 150 mm, 200 mm uç seçenekleri
Delme Derinliği	0.9 m
Karbüratör Tipi	Diyafram tip
Güvenlik Özellikleri	Otomatik durdurma, aşırı ısınma koruması
Titreşim Önleyici Sistem	Evet

Şekil 3.8.’de dikey hareket mekanizmasına monte edilen burgu sistemi görülmektedir.



Şekil 3.8. Burgu sistemi

3.1.6. Besleme ünitesi

Mobil robotun otomasyonu, çeşitli elektromekanik bileşenler kullanılarak sağlanmıştır. Sistem, elektronik pusula, panel bilgisayar, motorlar ve GPS alıcısı gibi elemanları çalıştırmak için AC ve DC güç kaynaklarına gereksinim göstermiştir. Bu amaçla, iki adet 12 volt 72 Ah kapasiteli bakım gerektirmeyen akü tercih edilmiştir. Bu aküler hem sistemin enerji ihtiyacını karşılamak hem de bakım kolaylığı sağlamak için seçilmiştir. Taşınabilirlik avantajı göz önünde bulundurularak enerji kaynağı olarak aküler kullanılmıştır, böylece robotun DC güç gereksinimleri karşılanmıştır. Motorların 24 V besleme voltajı ihtiyacı ise iki akünün seri olarak bağlanmasıyla giderilmiştir.

Şekil 3.9’da sistemde kullanılan aküler görülmektedir.



Şekil 3.9. Güç kaynağı

Motorlara bağlı akülerin işlem dışında şarj edilebilmesi amacıyla Einhell marka CE-BC 4 M model akü şarj cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Akü şarj cihazı

Einhell CE-BC 4 M akü şarj cihazı, teknik olarak gelişmiş ve güçlü akülere uygun bir şekilde tasarlanmış akıllı bir cihazdır. Mikroişlemci kontrollü bu akü şarj cihazı, farklı türdeki araç aküleri için uygun olup, çeşitli teknik koruma ve bakım mekanizmalarına sahiptir. Gelişiminin ana odak noktası, akülerin hızlı ve dikkatli bir şekilde şarj edilerek maksimum kullanım ömrünün sağlanmasıdır. Şarj cihazı, ayrıntılı bir şarj ekranına sahip olduğundan, kullanımı geleneksel cihazlara göre daha basittir. Bu çok yönlü cihaz, jel, AGM tipi aküler ve az bakım gerektiren kurşun asitli aküler için de uygundur.

CE-BC 4 M modeli, 12 V araç akülerine otomatik olarak uyum sağlamakta ve mikroişlemci kontrollü çok aşamalı şarj döngüsü, bağlı akünün tipini ve durumunu sürekli olarak analiz etmektedir. Bu analiz sonucunda, gerektiğinde optimum şarj modu otomatik olarak başlatılmaktadır. Yavaş şarj fonksiyonu, akünün ideal bir şarj durumunda kalmasını sağlayarak, tam boşalma riskini azaltmakta ve böylece akünün ömrünü uzatmaktadır.

Aşırı şarj, kısa devre ve ters kutup bağlantısı gibi durumlara karşı hem şarj cihazını hem de aküyü otomatik olarak koruyan CE-BC 4 M, IP65 koruma sınıfına sahiptir, bu da cihazın toz ve su sıçramalarına karşı korunduğunu göstermektedir. LCD ekrandan, akünün şarj durumunu ve cihazın hangi moda ayarlandığını kolayca görülebilmektedir. Cihaz, dört farklı şarj seviyesi arasında ayırım yapabilmekte ve 12 voltluk akülerle uyumlu olarak çalışmaktadır. Einhell akü şarj cihazının tamamen yalıtılmış kutup bağlantı kısıkaçları, kullanım sırasında güvenlik sağlamakta ve kolay bağlantı imkânı sunmaktadır.

Çizelge 3.3'te akü şarj cihazına ait teknik özellikler yer almaktadır.

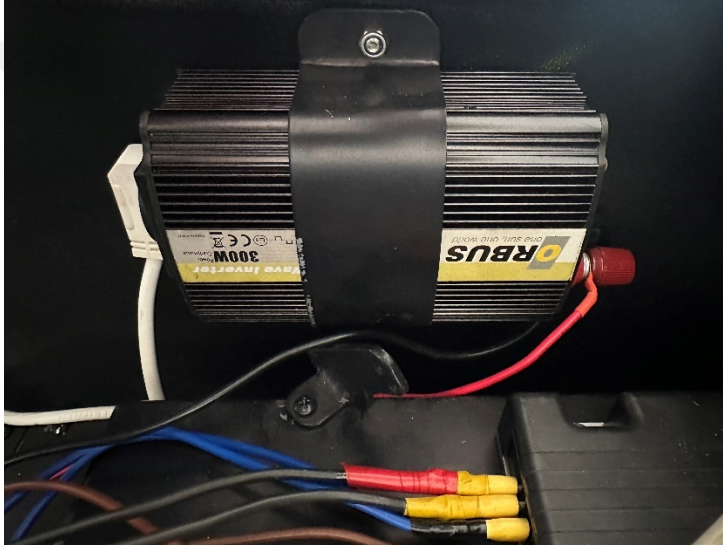
Çizelge 3.3. Akü şarj cihazı teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
Mikroişlemci Kontrollü	Akıllı akü şarj cihazı; çok kademeli şarj döngüsü
Şarj Cihazı Türü	Çok çeşitli akü tipleri için üniversal; jel, AGM, bakımsız ve düşük bakım gerektiren kurşun aküler vb.
Koruma Sınıfı	IP65; toza ve su sıçramasına karşı dayanıklı
Şarj İşlevleri	Yavaş şarj işlevi; sürekli ideal şarj durumu için
Akü Ömrü	Kullanım, akü ömrünü uzatır
Kış Şarj Modu	5°C altındaki ortamlar için tasarlanmış
Kurtarma Fonksiyonu	Tükenmiş aküler için ²

² (Devamı Arkada)

Güç Kaynağı Modu	Akülerin yeniden canlandırılmasına imkân tanımaktadır
Gösterge	LCD akü voltajı ve şarj ilerleme göstergesi
Koruma Özellikleri	Elektronik aşırı şarj, kısa devre ve ters kutup koruması
Kutup Bağlantı Kıskaçları	Tamamen yalıtılmış
Montaj	Duvara montaj için askı deliği

Motorlar dışındaki diğer bileşenlerin bazıları DC, bazıları ise AC güç kaynağı gerektirdiğinden, sistemde Orbis marka 300 wattlık bir invertör kullanılmıştır.



Şekil 3.11. İnvörtör

Sitemde kullanılan invertöre ait teknik özellikler Çizelge 3.4'te yer almaktadır.

Çizelge 3.4. İnvörtör teknik özellikleri

Özellik	Açıklama
Ürün	İnvörtör
Giriş Voltajı	DC 12 V
Çıkış	220 Volt AC, 50 Hz
Sürekli Güç	300 Watt ³

³ (Devamı Arkada)

Tip	Modifiye sinüs
Maksimum Güç	600 Watt
Koruma Özellikleri	Kısa devre koruması, koruma sigortası
Ek Özellikler	Aşırı yük ve ısınma durumunda sesli ikaz
Belgelendirme	CE ve TSE Belgeli
Model	CAR300 / MS-300W

Çizelge 3.5, mobil robotun enerji tüketimi ve çalışma süresi ile ilgili hesaplamaları içermektedir. Bu hesaplama, robotun meyve bahçesi koşullarında kesintisiz olarak çalıştığı, 250 watt ve 500 watt gücündeki motorlar arasında geçiş yaparak işlem gerçekleştirdiği ve diğer tüm bileşenlerin sürekli aktif olduğu şartlara dayanmaktadır. Robotun toplam çalışma süresi yaklaşık 3,53 saat olarak belirlenmiş olup, bu süre boyunca robotun yaklaşık 270 adet fide çukuru açtığı hesaplanmıştır. Bu veriler, robotun performansını ve dayanıklılığını değerlendirme açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Çizelge 3.5. Robot enerji tüketimi ve çalışma süresi hesaplama

Bileşen	Akım Çekimi (A)	Süre (s)	Toplam Akım Saniyesi (A·s)
250 W Motorlar	3	7	21
500 W Motor	15	40	600
Diğer Bileşenler	7.185	47	337.695
Toplam			958.695

3.1.7. Panel bilgisayar

Tasarlanan sistemde bütün elektronik cihazların yönetilmesi ve aralarındaki haberleşmenin sağlanması amacıyla, Şekil 3.12’de gösterildiği üzere 7 inç dokunmatik ekranlı Lilliput marka PC-700 model endüstriyel panel bilgisayar kullanılmıştır. Bu endüstriyel bilgisayarın tercih edilmesindeki ana nedenler; üzerinde bulunan iletişim portlarının yeterli sayıda olması, maliyetinin uygunluğu ve all-in-one teknolojisinin sağladığı avantajlardır.

Kullanılan bilgisayarın görevleri;

- GPS alıcısından gelen verileri almak ve depolamak.
- Yazılımı çalıştırarak navigasyon verilerini oluşturmak.
- DC motorları çalıştırmak ve onlar için gerekli kontrol bilgilerini oluşturmak.
- Toprak burgu sisteminin yazılımsal olarak kontrolünü sağlamak.

- Elde edilen verilerin internet aracılığıyla uzaktaki bir bilgisayara iletilmesini sağlamaktır.



Şekil 3.12. Lilliput PC-700 endüstriyel panel bilgisayar

Şekil 3.13'e endüstriyel bilgisayara ait bağlantı noktaları görülmektedir.



Şekil 3.13. Endüstriyel bilgisayar bağlantı noktaları

Çizelge 3.6'da endüstriyel bilgisayarın teknik özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.6. Lilliput PC-700 endüstriyel bilgisayarın teknik özellikleri

Özellik	Değer
İşlemci	Intel N2800, dual-core 1.86GHz
Chipset	Intel NM10 chipset
Hard disk	PCIe mSATA SSD 32G, 128G'a kadar çıkarılabilir
RAM	2G DDR3
Ekran	7" LED
Güç tüketimi	≤24W
USB	2 adet Usb 2.0
LAN, LPT	2 adet LAN, 1 adet LPT
RS232	5 adet seri port (RS-232)
Ebat (LWD)	200 x 117x 46 mm
Ağırlık	1225g
Besleme voltajı	DC 12V
Çözünürlük	800x480
En-Boy oranı	16:9

3.1.8. GPS alıcısı

Mobil robotun otonom şekilde ilerlemesi ve yönlendirilmesi için, robotun bulunduğu konumun coğrafi koordinatlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle, robot üzerine Promark 500 marka/model GPS alıcısı takılmıştır. Bu alıcı, 75 kanal kapasitesi ve saniyede 20 hertz'e kadar veri aktarım hızı sunmaktadır. Promark 500, çoklu işletim modları, konfigürasyon seçenekleri, çeşitli haberleşme modülleri (UHF, GSM/GPRS, EDGE) ve protokoller sunan esnek bir GNSS alıcısıdır. Telefon sim kartı kullanılarak Türkiye'deki Corse-TR (Continuously Operating Reference Stations - Turkey) sistemine bağlanabilmekte ve bu sistemden düzeltme sinyallerini alabilmektedir. Bu alıcının %99 güven aralığına sahip olduğu ve katalog verilerine göre düzeltme sinyalleri ile konum hassasiyetinin milimetre düzeyine indirilebildiği belirtilmiştir. ProMark 500, uzun süreli saha operasyonları için kritik bir özellik olan uzun pil ömrüne sahiptir, bu da kullanıcıların gün boyunca kesintisiz çalışmasını mümkün kılmaktadır. Ayrıca, alıcı farklı hava koşullarına uygun olarak saha çalışmaları için tasarlanmış, dayanıklılığı artırmak amacıyla sağlam bir muhafaza ile donatılmıştır. Promark 500 ile diğer elektronik

cihazlar arasında RS-232, Bluetooth ve USB portları üzerinden NMEA 0183 protokolü kullanarak veri transferi gerçekleştirilmektedir. Ölçülen coğrafi koordinatlar, ilerleme hızı ve doğrultu açısı gibi bilgiler robotun üzerindeki endüstriyel bilgisayara seri port aracılığıyla gönderilmiştir. GPS alıcısı ile bilgisayar arasında kullanılan haberleşme RS-232 seri haberleşme protokolü ve 9600 baud hızındadır. Alıcının kesintisiz sinyal alabilmesi için mobil robotun arka üst kısmına monte edilmiştir. GNSS alıcısı ve endüstriyel bilgisayar arasında 9600 baud hızında ve RS-232 seri haberleşme protokolü ile çalışan bir yazılım geliştirilmiştir.

Şekil 3.14'te Promark 500 GPS alıcı görülmektedir.



Şekil 3.14. Promark 500 GPS alıcısı

Şekil 3.15'te GPS alıcısının mobil robot üzerindeki yerleşimi görülmektedir.



Şekil 3.15. Promark 500 GPS alıcısının mobil robot üzerindeki yerleşimi

GPS alıcısının teknik özellikleri çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Promark 500 GPS alıcısının teknik özellikleri

ÖZELLİK	DEĞER
Uygulama	Jeodezik Alım Aplikasyon Uygulamaları, İnşaat Jeoloji, Jeofizik Uygulamaları, Hassas GIS Çalışmaları
Alıcı Tanımı	Çift frekanslı GNSS alıcısı
Kanal Sayısı	75
RTK Çözüm Menzili	100 km
Init Süresi	2 sn.
RTK Init. Güven Düzeyi	%99
İzlenebilen Sinyaller	GPS: L1 C/A kod, L1/L2 P kod ve L1/L2 tam dalga boyu taşıyıcı, GLONASS: L1 kod, L2 P kod, L1/L2 tam dalga boyu taşıyıcı, SBAS (WAAS-EGNOS-MSAS) : kod ve taşıyıcı
RTK Hassasiyeti (Fix)	Yatay: 10 mm + 1 ppm Düşey: 20 mm + 1 ppm
RTK Hassasiyeti (Flying)	Yatay: 50 mm + 1 ppm Düşey: 200 mm + 1 ppm
Statik Ölçü Hassasiyeti	Yatay: 5 mm + 0.5 ppm Düşey: 10 mm + 1 ppm
Kinematik Ölçü Hassasiyeti	Yatay: 10 mm + 1 ppm Düşey: 20 mm + 1 ppm
SBAS (WAAS-EGNOS-MSAS)	Yatay < 1 m
Radio Modem	Magellan 430-470 Mhz
GSM/GPRS Modem	Magellan 4 bantlı GPRS/EDGE modem
Portlar	1 x RS-232, 1 x RS-422, 1 x USB, 1 x Bluetooth, PPS ve Event Marker
Veri Kayıt Aralığı	0.1-999 sn
Veri Giriş-Çıkış Tipleri	RTCM 2.3, RTCM 3.1, CMR, CMR+, Magellan ATOM, NMEA 0183, NTRIP, DBEN
Veri Çıkış Hızı	10 Hz (20 Hz’e kadar arttırılabilir)

3.1.9. El kumandası

Mobil robotun manuel kontrolünü sağlamak için şekil 3.18’de görüldüğü gibi USB el kumandası (Logitech Europe S.A., İsviçre) kullanılmıştır. El kumandasında, çeşitli fonksiyonlar için programlanabilen 11 adet tuş kontrolü ve bir kumanda kolu yer almaktadır.



Şekil 3.16. Manuel kontrol için kullanılan el kumandasının robot üzerindeki konumu

3.1.10. Elektronik pusula

Mobil robot, GPS alıcısından elde edilen coğrafi veriler (enlem, boylam, hız, zaman vb.) kullanılarak çukur açma lokasyonlarına yönlendirilmektedir. Navigasyon doğruluğunu artırmak amacıyla Honeywell HMR3200 (Honeywell International AŞ., Charlotte, NC, ABD) dijital pusulası kullanılmıştır (Şekil 3.17.). Bu cihaz, üç eksen boyunca manyetik alanları tespit edebilen sensörler ve eğim telafisini sağlayan ivme ölçerler ile entegre edilmiştir. Bu özellikler, robotun her yönde doğru yön bilgisini almasını sağlamaktadır. HMR3200 ayrıca geniş bir sıcaklık aralığında çalışabilmekte, bu da onu çeşitli çevre koşullarına uygun kılmaktadır. Güç tüketiminin düşük olması ile öne çıkan bu cihaz, el tipi navigasyon cihazları, deniz elektroniği ve robot teknolojisi gibi pille çalışan uygulamalar için tercih sebebi olmaktadır. Ayrıca, diğer sistem ve cihazlarla kolay entegrasyon için seri iletişim arayüzüne de sahiptir.



Şekil 3.17. Elektronik pusula

Pusulanın robot üzerindeki konumu şekil 3.20’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Pusulanın robot üzerindeki konumu

Çizelge 3.8’de Honeywell HMR3000 elektronik pusulanın teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.8. Honeywell HMR3000 elektronik pusulanın teknik özellikleri

Özellik	Bilgiler
Eksen	X,Y,Z
Ölçüm Aralığı	± 1 Gauss, $\pm 40^\circ$
Kararlılık	1 mGauss, 0.1°
Arayüz	RS-232
Çalışma Sıcaklığı	$-20^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ (TA)

3.1.11. Yazılım geliştirme ortamı

Mobil robot ve delme sisteminin tasarımı ve çizimi için SOLIDWORKS yazılımı kullanılmıştır. Robot navigasyon sistemi ve delme mekanizması yazılımının oluşturulmasında Visual Studio.NET 2015 (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) platformunda (Microsoft Corp., Redmond, WA, ABD) Microsoft Visual Basic.NET programlama dili kullanılmıştır. ArcMap programı, sistemin işleyişini analiz etmek, hassasiyet sınırlarını tespit etmek, coğrafi koordinat farklılıklarını hesaplamak ve haritalar oluşturmak amacıyla kullanılmıştır.

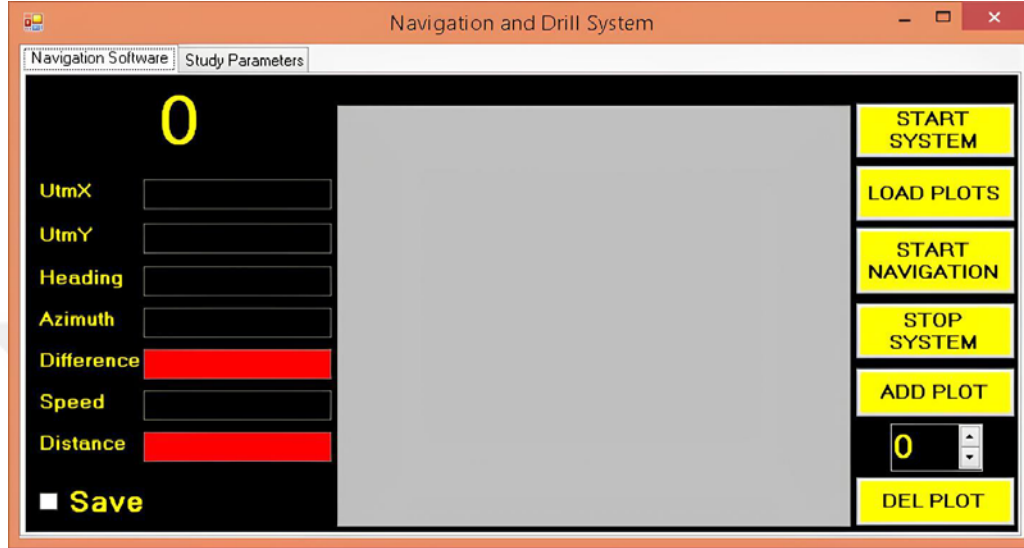
3.2. Metot

Bu çalışmada, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) kullanılarak meyve bahçelerinde ağaç dikilecek yerlerin belirlenmesi, otonom bir burgu robotunun geliştirilmesi ve geliştirilen robotun dikim çukurları açmak için kullanılması amaçlanmıştır. Tarımsal mobil robot, diferansiyel yönlendirme ve sabit hedef konumlara ileme kabiliyetine sahip, dört tekerlekli, holonomik olmayan bir robottur. Tasarlanan mobil robot GPS verilerinin işlenmesiyle elde edilen veriler dâhilinde tamamen otonom, kısmen otonom veya tamamen manuel modlarda kullanılabilir. Bu hedefe yönelik olarak, elektronik ve bilgisayar bileşenlerini içeren elektromekanik bir yapı geliştirilmiş ve sistemin bütün olarak işlemlerini mümkün kılan yazılımsal bir mimari oluşturulmuştur.

3.2.1. Yazılımsal çözümler

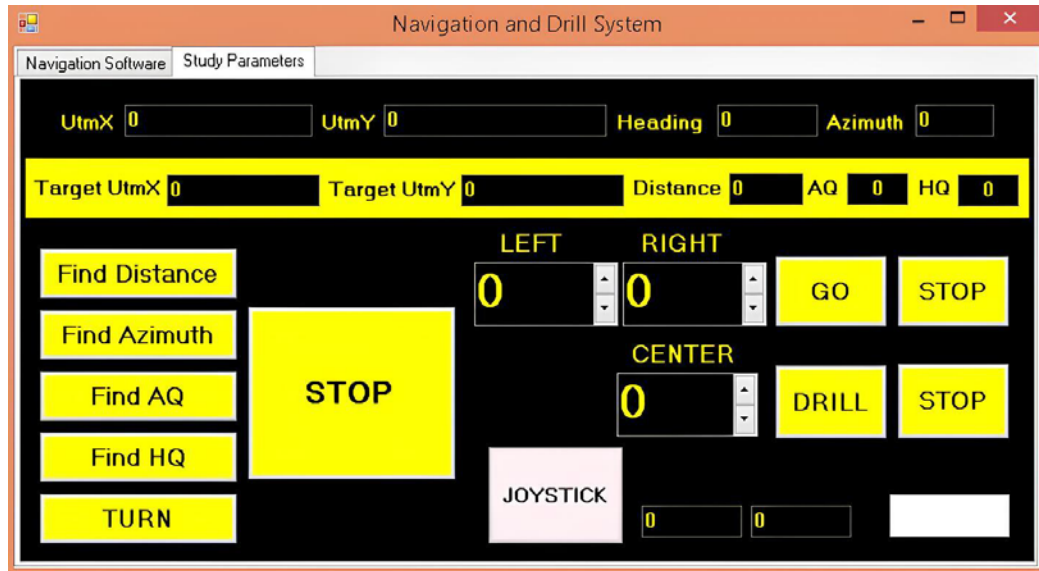
Geliştirilen yazılım sayesinde mobil robotun çalıştırılması, izlenmesi ve kontrol edilmesi mümkün hale getirilmiştir. Yazılım, mobil robotun otonom navigasyonunu ve burgu sisteminin çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Robotun delik açacağı noktaların koordinatları, dijital uydu görüntüsü üzerinde ArcMap uygulaması kullanılarak belirlenmiştir ve bir görev dosyası oluşturulmuştur. Oluşturulan görev dosyası, mobil robotun üzerindeki endüstriyel panel bilgisayara yüklenmiştir. Mobil robotun çalışma alanında otonom olarak hareket edebilmesi için bir navigasyon programı geliştirilmiştir. Navigasyon programı, mobil robotu hem manuel hem de otomatik olarak kontrol etmek için Visual Basic.NET dili kullanılarak Visual Studio.NET 2015'te oluşturulmuştur (Şekil 3.19). Ayrıca geliştirilen yazılım, mobil robot hedef noktaya

ulaştığı anda çukur açma mekanizmasını devreye sokmaktadır. Tüm bu aktivitelerin gerçekleşmesi, mobil robotun endüstriyel bilgisayarına yüklenen görev dosyasına bağlıdır. Görev dosyası, mobil robot navigasyonu tarafından kullanılan coğrafi konum, enlem ve boylam koordinatlarıyla tanımlanan noktaların bir listesidir. Ayrıca zeminde açılacak çukur noktalarının yerleri de bu koordinatlarla belirtilmektedir. Geliştirilen yazılım kodları Ek-1’de verilmiştir.



Şekil 3.19. Navigasyon yazılımı

Şekil 3.20’de geliştirilen yazılımın çukur açma prosedürleri görülmektedir.



Şekil 3.20. Çukur açma yazılımı

3.2.1.1. Motorların yerleşimi ve kontrol algoritması

Mobil robotu hareket ettirebilmek için her bir tekerleğinde 0.25 kW gücünde DC motor kullanılmıştır. Mobil robotun hareket sistemi, diferansiyel sürüş üzerine kuruludur.

Robotun sağ ön motoru sağ arka motorla, sol ön motoru ise sol arka motorla seri bağlantıyla eşleştirilmiştir. Bu düzenleme, sağ ve sol motor gruplarının diferansiyel yöntemle çalışmasını sağlamaktadır, böylece robot diferansiyel sürüş sisteminden faydalanmaktadır. Bu sistem sayesinde robotun sol ve sağ tekerlekleri farklı hızlarda dönebilmektedir. Mobil robotun düz bir hat boyunca ilerlemesi için tüm tekerleklerin hızının ayarlanması gerekmektedir. Farklı hızlardaki tekerlekler, robotun daha yavaş olan tekerleğin yönüne doğru dönmesine neden olmaktadır. Ayrıca, mobil robotun sol ve sağ tekerleklerini ters yönler çevirerek yerinde 360 derece dönüş yapabilmesi de sağlanmıştır. Burgu sisteminin yukarı aşağı hareket edebilmesi için dikey hareketin sağlanması amacıyla 0.5 kW gücünde 5. DC motor H şekilli ızgaranın üzerine monte edilmiştir.

Roboteq FDC3260 marka 3 kanallı motor kontrol kartı vasıtasıyla sistemdeki DC motorların yönü ve çalışma hızı kontrol edilmiştir. Motor kontrol ünitesi, RS232 iletişim protokolünü kullanarak seri port aracılığıyla endüstriyel bilgisayara bağlanmaktadır. Bu bağlantı sayesinde, endüstriyel bilgisayar içinde yüklü olan yazılım aracılığıyla kontrol ünitesine motor çalışma verileri gönderilmektedir.

Yazılımdan motor kontrol kartına gönderilen 0 ile 127 arasındaki heksadesimal sayısal değerler aracılığıyla, robotun ileri veya geri, burgu sisteminin aşağı veya yukarı ve tüm sistemlerin hızlı veya yavaş hareket etmesi sağlanmaktadır. Çizelge 3.9, motor kontrol algoritmasında kullanılan bu verileri içermektedir.

Çizelge 3.9. Robot sistemi motor kontrol algoritması verileri

Durum	Kontrol Sinyali	Komut		Motor Hızı	
		Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2
Motor İleri	!A00 – 7F	!A7F ↑	!A3F ↑	İleri Hızlı	İleri Yavaş
Motor Geri	!a00 – 7F	!a3F ↓	!A7F ↑	Geri Yavaş	İleri Hızlı
Motor Dur	!A00 veya !a00	!A00	!a3F ↓	Dur	Geri Yavaş

Tablolardaki motor 1 ile otonom robotun sol ön motoru ile sol arka motoru, motor 2 ile otonom robotun sağ ön motoru ile sağ arka motoru, motor 3 ile burgu sistemini hareket ettiren beşinci motor temsil edilmiştir.

Burgu sistemi motor kontrol algoritması çizelge 3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.10. Burgu sistemi motor kontrol algoritması verileri

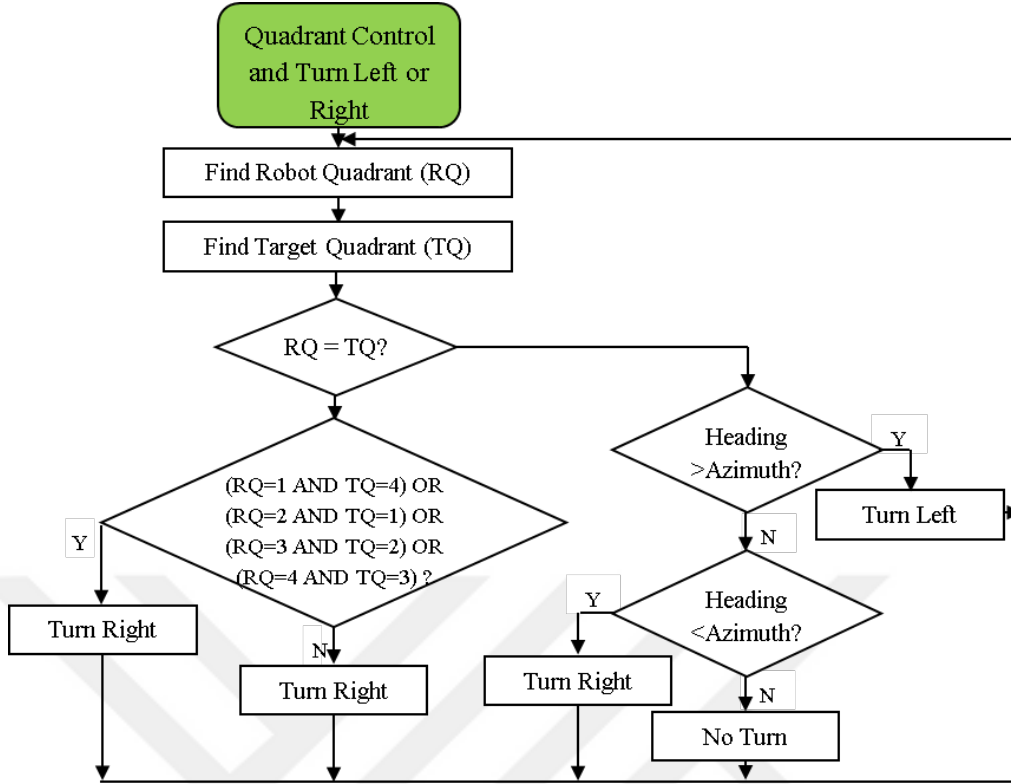
Durum	Kontrol Sinyali		
		Motor 3 Komut	Motor 3 Yön
Motor Yukarı	!A00 – 7F	!A7F ↑	Yukarı Hızlı
Motor Aşağı	!a00 – 7F	!a3F ↓	Aşağı Yavaş
Motor Dur	!A00 veya !a00	!A00	Dur

3.2.1.2. GPS verilerinin işlenmesi ve navigasyon algoritması

Mobil robotun otonom şekilde yönlendirilip ilerletilebilmesi için, robotun konumunu belirleyen coğrafi koordinat verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, robot üzerine RTK GPS sistemi takılmıştır. Ayrıca, gerektiğinde manuel kontrol sağlamak amacıyla da robota bir el kumandası (joystick) monte edilmiştir.

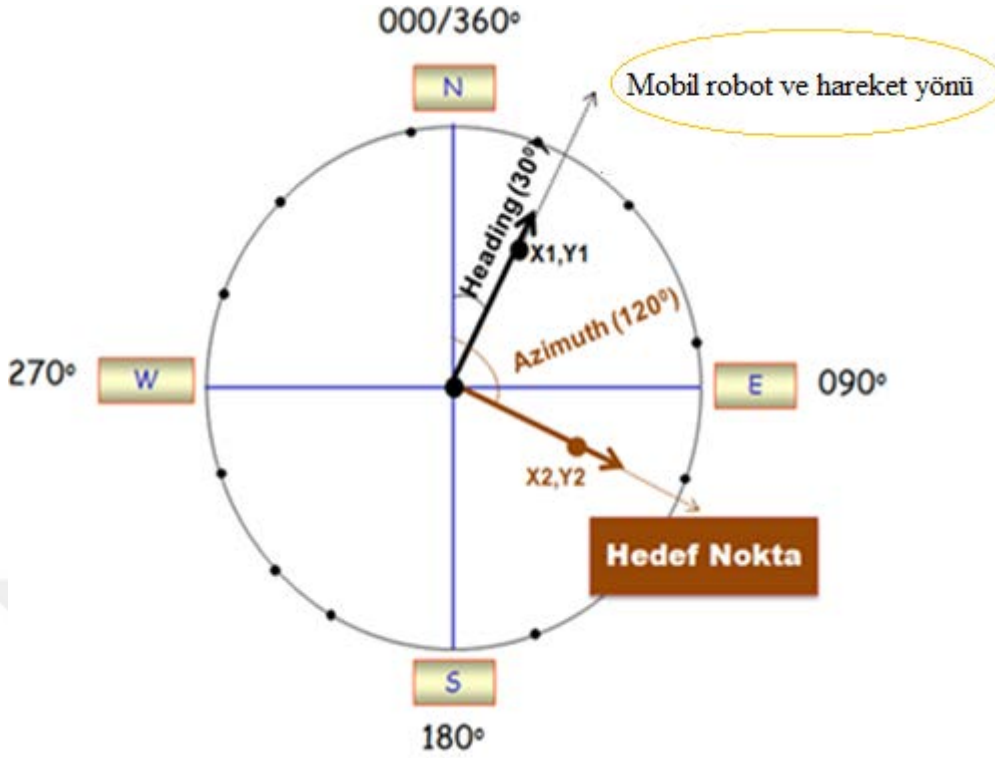
Mobil robot dönüşlerini en aza indirmenin en önemli unsuru çeyrek daire kontrolüdür. Pusula kadranda dört farklı derece aralığı vardır: 1. çeyrek 0 ila 90 derece, 2. çeyrek 90 ila 180 derece, 3. çeyrek 180 ila 270 derece ve 4. çeyrek 270 ila 360 (veya 0) derecedir. Çeyrek kontrolüne dayalı olarak mobil robot düz ileri, sola veya sağa hareket edeceğini belirlemektedir. Bu kontrol, robotun ve hedef noktasının hangi kadranda olduğuna göre yapılmaktadır (Ünal ve Topakci 2015).

Çeyrek daire kontrol mekanizmasının akış şeması Şekil 3.21'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Çeyrek daire kontrol mekanizmasının akış şeması (Ünal ve Topakci 2015)

Mobil robotun istenilen noktaya yönlendirilmesi için azimuth ve heading açılarıyla mevcut konumdan hedefe olan mesafe bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.22’de görüldüğü gibi, heading açısı platformun kuzeye göre yönünü göstermektedir. Azimuth açısı ise hedefin mobil robota ve kuzeye göre konumunu belirlemektedir. Hedef noktasına ait koordinatlar, "\$GPRMC" başlığı altında yer alan enlem ve boylam bilgileriyle sağlanmaktadır. Mobil robot ile hedef nokta arasındaki koordinatların matematiksel ilişkisi temel alınarak yönlendirme işlemi gerçekleştirilmektedir. Mobil robotun heading ve hedefin azimuth açısı eşleştiğinde, robot doğru yöne dönmektedir. Bu bilgiler, platformun üzerinde bulunan endüstriyel bilgisayar tarafından sürekli olarak hesaplanmakta, böylece platformun hedefe doğru anlık ayarlamaları mümkün olmaktadır.



Şekil 3.22. Heading ve Azimuth açıları

Mobil robotun mevcut konumunun coğrafi koordinatları (X_1, Y_1) ve hedefin coğrafi koordinatları (X_2, Y_2) arasındaki uzaklık, navigasyon programı tarafından Denklem 3.5'e dayanarak belirlenir.

$$\text{Mesafe} = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2} \quad (3.5)$$

Burada;

X_1 : Mobil robotun mevcut konumunun enlemi (m)

Y_1 : Mobil robotun mevcut konumunun boylamı (m)

X_2 : Mobil robotun yöneleceği hedef noktanın enlemi (m)

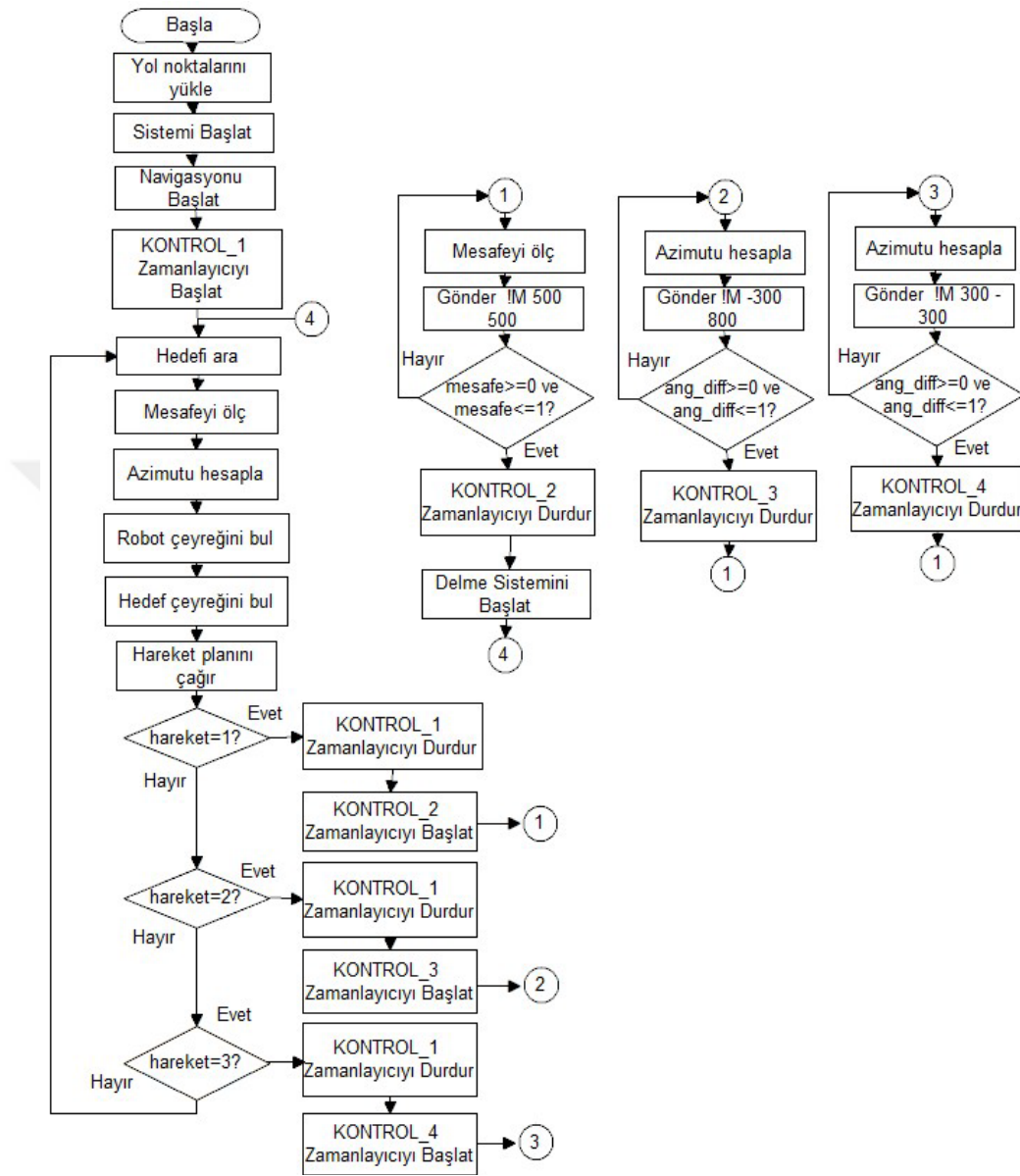
Y_2 : Mobil robotun yönleneceği hedef noktanın boylamı (m)

Hedef noktanın kuzey kutbu ile olan konum açısı (Azimuth), Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\text{Azimuth} = \text{Atan2}((Y_2 - Y_1); (X_2 - X_1)) * 180/\pi \quad (3.6)$$

Navigasyon metodolojisinde, mobil robotun hedefe doğru bir şekilde yönlendirilmesi için, robotun heading açısıyla hedef noktanın azimuth açısı aynı hizada oluncaya kadar sağa veya sola dönüş yapılması gerekmektedir. Son olarak, mobil robot, yön açısı azimuth açısına eşit olduğunda ve mesafe sıfıra eşit olduğunda mobil robot

hedefine ulaşmaktadır. Mobil robot navigasyon yönteminin akış şeması Şekil 3.23'te gösterilmektedir.

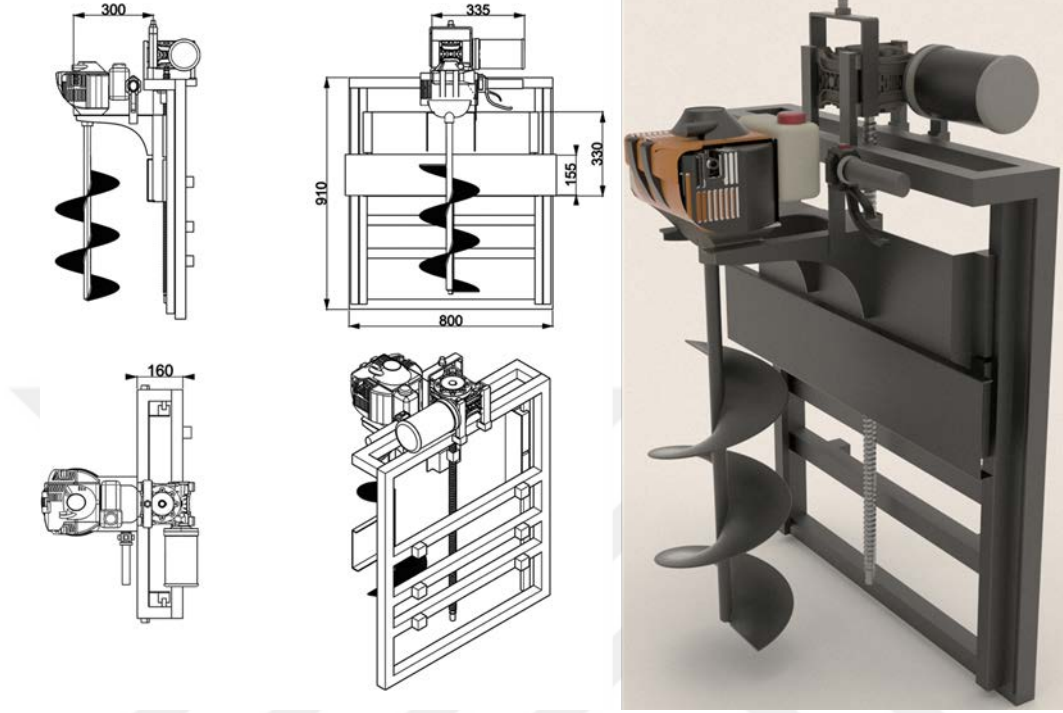


Şekil 3.23. Mobil robot navigasyon yönteminin akış şeması

3.2.1.3. Toprak burgusu kontrol algoritması

Dikey hareket mekanizmasının yapımında paslanmaz çelik kullanılmıştır. Mekanizmanın bazı parçaları 30 x 30 x 3 mm ölçülerinde kare çelik borudan yapılmıştır. Sistemin mekanik yapısını oluşturan iki bileşen, H şeklindeki taşıyıcı ızgara ve toprak burgu makinesidir. Dikey hareket için H şeklinde bir taşıyıcı ızgara oluşturmak amacıyla iki adet 30 x 30, 910 mm ve üç adet 30 x 30, 800 mm kare çelik boru kullanılmıştır. Bu H şeklindeki taşıyıcı ızgara daha sonra otonom mobil robotun arkasına takılarak toprak burgu makinesi H şeklinde bir ızgara üzerine monte edilmiştir (Şekil 3.24). H şeklindeki ızgara üzerindeki iki çelik doğrusal kılavuz, yastık bloklar ve 30 mm doğrusal ray şaft

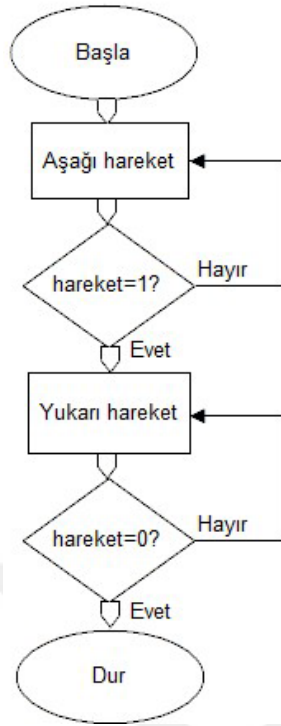
kılavuz destekleri ile ayarlanmıştır. Lineer kılavuzların uzunluğu 910 mm'dir. Dikey hareket için 24 V, 500 W, 1440 rpm'lik bir DC motorla bağlantılı 1:40 oranlı bir redüktör kullanılarak 30 x 850 mm'lik bir bilyeli vidayı tahrik ederek doğrusal bir aktüatör oluşturulmuştur.



Şekil 3.24. Toprak burgu makinesinin ve H şeklindeki ızgaranın tam ölçekli teknik çizimi.

Mobil robot hedef konuma ulaştığında, toprak burgusu çalışmaya başlamakta ve bağlı olduğu sistem aşağı doğru hareket etmektedir. Burgu, istenilen derinliğe ulaştığında bağlı olduğu sistem tekrar yukarıya çıkmaktadır ve burgu topraktan tamamen çıktığında durmaktadır. Ardından robot, bir sonraki noktaya doğru hareketine devam etmektedir.

Burgu sistemine ait akış diyagramı şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.25. Toprak burgusu akış şeması

3.2.2. Mobil robot test işlemleri

Tarla koşullarında mobil robotun çalışma durumunu değerlendirmek amacıyla testler gerçekleştirilmiştir. Bu testler sırasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

- Mobil robotun tarla üzerinde çalışabilmesi için gerekli olan görev dosyasının oluşturulması,
- Mobil robotun doğrusal bir çizgi üzerinde konumlandığı mevcut hedef nokta ile ulaşması gereken hedef nokta arasındaki sapma oranlarının belirlenmesi,
- Mobil robotun tarla üzerindeki çeşitli noktalara otonom olarak hareket etmesi sonucu ortaya çıkan hata oranlarının belirlenmesi,

Her aşama için gereken uygulamalar aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.2.2.1. Çukur açma işlemi için navigasyon iş dosyasının oluşturulması

Mobil robotun tarla içerisinde hareket edebilmesi için mevcut konumuna ait konum bilgileri (enlem, boylam, yön) ile gitmeyi hedeflediği noktaların konum verilerinin bilinmesi zorunludur. Mobil robotun bulunduğu konum bilgileri, üzerinde bulunan GPS alıcısı sayesinde geliştirilen yazılıma iletilmektedir. Fakat, robotun hareket edeceği noktaların lokasyon verilerin de yazılım tarafından bilinmesi zorunludur. Bu bilgiler sayesinde mobil robot, gitmek istediği noktalar için uygun rotayı hesaplayabilmektedir. Bu nedenle, geliştirilen sistemde, mobil robotun hedef noktalarının konum verilerinin toplu olarak girilebilmesini sağlayan bir yapı oluşturulmuştur.

Mobil robotun hedef noktalarına ait pozisyon bilgileri, geliştirilen yazılım aracılığıyla girilebilmektedir. Kullanıcıların hedef noktaları belirlemek için iki farklı yöntem kullanmaları gerekmektedir. Birinci yöntem, tarla üzerinde GPS alıcısı kullanarak noktaların toplanmasıdır. İkinci yöntem ise, çalışma alanına ait dijital uydu görüntülerinin ArcGIS haritalama programına yüklenerek, hedef noktaların bilgisayar ortamında belirlenmesidir. Her iki yöntemde de elde edilen konum verilerinin UTM formatında olması gerekmektedir. Bu çalışmada kazılması gereken deliklerin yerlerini belirlemek için ArcMap uygulaması kullanılmıştır.

Çalışma sahasına ait hedef bazı noktaların navigasyon verileri çizelge 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Mobil robotun gitmesi gereken noktalara ait örnek navigasyon verileri

spot_no	utm_x	utm_y
1	3410932,993	4425013,984
2	3410938,131	4425012,984
3	3410943,634	4425012,984
4	3410949,138	4425012,984
5	3410954,853	4425012,984
6	3410960,568	4425012,984
7	3410931,993	4425007,269
8	3410938,131	4425007,269
9	3410943,634	4425007,269
10	3410949,138	4425007,269
11	3410954,853	4425007,269
12	3410960,568	4425007,269
13	3410931,993	4425001,131
14	3410938,131	4425001,131
15	3410943,634	4425001,131

3.2.2.2. XTE hata oranının belirlenmesi

Otonom sistemlerde, robotların veya araçların hedeflenen rotaya ne kadar sadık kaldıklarını değerlendirmek için kullanılan temel ölçütlerden biri çapraz iz hatası (XTE) olarak adlandırılmaktadır. XTE, bir mobil robotun hedeflenen pozisyon ile gerçek pozisyonu arasındaki en kısa dik mesafeyi temsil etmektedir ve bu hata, robotun rotasından ne kadar saptığını gösteren önemli bir metriktir.

Bu çalışmada, XTE hata oranı, otonom mobil robotun belirlenen hedeflere giderken gösterdiği doğruluğu ve sapmaları değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır. Robotun belirlenen konumlarda açması gereken çukurların koordinatları bir harita üzerinden dijital olarak tanımlanmış ve robot bu koordinatlara göre hareket ettirilmiştir. Ancak gerçek dünyadaki çevresel koşullar ve sistemlerin doğruluk sınırlamaları nedeniyle, robotun hedeflenen noktalardan sapmalar yaşaması kaçınılmazdır. Bu sapmalar, XTE kullanılarak ölçülmüş ve analiz edilmiştir.

XTE'nin hesaplanmasında, hedeflenen ve gerçek konumlar arasındaki Öklid uzaklığı dikkate alınmıştır. Bu mesafe, robotun navigasyon algoritmasının performansını ve doğruluğunu değerlendirmek için önemli bir kriterdir. Ortalama hata oranı ve standart sapma gibi istatistiksel değerler hesaplanarak, robotun ne kadar sapma gösterdiği ve bu sapmaların ne kadar tutarlı olduğu belirlenmiştir. Hata oranlarının düşük olması, robotun belirlenen hedeflere yeterince doğru bir şekilde ulaşabildiğini, yüksek XTE değerleri ise rotadan sapmalar olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerde, sistemin genel doğruluğu incelenmiş ve XTE değerleri üzerinden robotun performansı değerlendirilmiştir. Robotun rotasında meydana gelen sapmaların minimum düzeyde tutulması, sistemin optimizasyon sürecinde önemli bir hedeftir. Bu bağlamda XTE analizi, robotun geliştirilmesi gereken yönlerini ortaya koyarak, sistemin daha yüksek doğrulukla çalışmasını sağlamaktadır.

Bu yöntem, otonom sistemlerde navigasyon doğruluğunun değerlendirilmesi için yaygın olarak kullanılmakta olup, bu çalışmada da robotun başarılı bir şekilde delikleri doğru pozisyonlarda açabilme yeteneğinin bir göstergesi olarak kullanılmıştır.

Şekil 3.26'da XTE hata ölçüm işlemleri görülmektedir.



Şekil 3.26. XTE hata ölçüm işlemi

3.2.3. Toprak burgusu ile çukur açma test işlemleri

Delme noktalarının belirlenmesi, haritalanması ve mobil robota entegre edilen toprak burgu sisteminin güvenilirliğinin tespit edilmesi amacıyla test işlemleri yapılmıştır. Çalışma alanına ait özellikler ve haritama işlemleri sırasıyla açıklanmıştır.

3.2.3.1. Toprak burgusu ile çukur açma işleminde kullanılan deneme alanı

Geliştirilen robot sistemiyle yapılan tüm deneysel değerlendirmeler, Akdeniz Üniversitesi arazisinde ($36^{\circ} 53' 54''$ K ve $30^{\circ} 38' 27''$ D) gerçekleştirilmiştir. Deneysel alan, deniz seviyesinden 32 m yükseklikte ve 3,1 da büyüklüğündedir. Mobil robot, deneysel alanda yapılan inceleme boyunca otonom olarak 84 farklı noktaya yönlendirilmiştir. Her noktada 30 cm derinliğinde bir dikim çukuru kazmak için toprak burgusu kullanılmıştır. Bu çalışmada dikim çukurlarını açmak için otonom dur-kalk navigasyon yaklaşımı uygulanmıştır. Dur-kalk tekniğinin arkasındaki ana fikir, dikim çukurları açılırken robotu durdurmaktır. Bu yaklaşımla, tarım robotu ilk kazma noktasına gider, durur, bir çukur kazar ve ardından bir sonraki noktaya geçer.

3.2.3.2. Çukur açma noktalarının doğruluğunun belirlenmesi

Tasarımı yapılan otonom burgu robotun hedef noktaya ulaşma hassasiyetini belirlemek amacıyla test işlemi gerçekleştirilirken aynı zamanda delme noktalarının da doğruluğunu belirlemek için çalışmalar yapılmıştır. Şekil 3.27'de çukur açma noktalarının doğruluğunun belirlenmesi için yapılan işlemler görülmektedir.



Şekil 3.27. Otonom burgu robotu ile çukur açma noktalarının doğrulunun belirlenmesi

3.2.3.3. Çukur açma noktalarının haritalanması

İlk olarak, fidan dikmek için kazılması gereken çukurların yerlerini bulmak amacıyla ArcMap uygulaması kullanılarak mobil robot için görev dosyası hazırlanmıştır. İkinci aşamada, hazırlanan görev dosyası mobil robot üzerinde bulunan endüstriyel bilgisayara yüklenerek robotun, çukur açma noktalarına sırayla otonom olarak gitmesi ve çukurları açması sağlanmıştır.

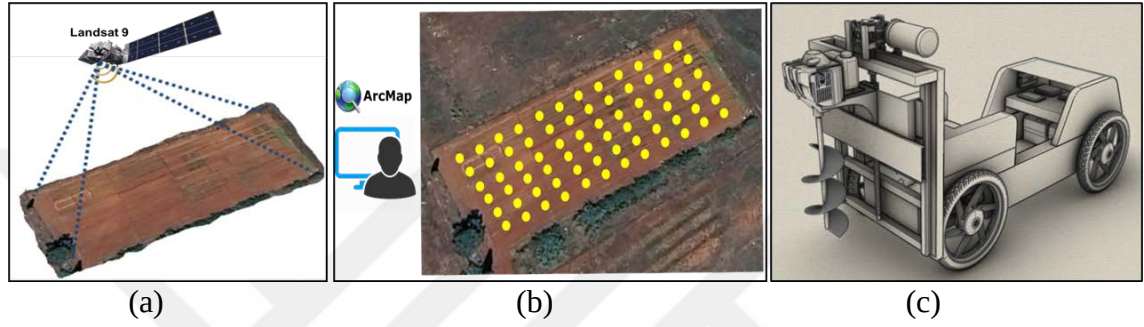
ArcMap uygulaması, CBS içerisinde yaygın olarak kullanılan ve harita tabanlı analizler yapmaya olanak sağlayan güçlü bir yazılımdır. ArcMap yardımıyla, fidanların dikileceği alanın detaylı haritası çıkarılmış ve bu harita üzerinde çukurların açılacağı spesifik noktalar belirlenmiştir. Bu süreçte, toprağın yapısı, fidanların büyüme mesafeleri ve çevresel faktörler dikkate alınarak ideal delme noktaları tespit edilmiştir. Belirlenen bu noktalar, robotun takip edeceği güzergahı oluşturacak şekilde dijital bir görev dosyasına dönüştürülmüştür.

İkinci aşamada, hazırlanan görev dosyası mobil robot üzerinde bulunan endüstriyel bilgisayara yüklenmiştir. Bu endüstriyel bilgisayar, robotun operasyonlarını koordine eden ve kontrol eden ana birim olarak işlev görmektedir. Robot, kendisine yüklenen bu görev dosyasındaki talimatları izleyerek, belirlenen çukur açma noktalarına sırayla otonom olarak gitmiştir. Robotun navigasyon sistemi, GPS ve diğer sensörler yardımıyla konumunu hassas bir şekilde belirleyerek, önceden tanımlanmış rotayı takip etmesini sağlamıştır. Robot, her bir çukur açma noktasına ulaştığında, otomatik olarak durarak gerekli çukurları açmış ve böylece fidan dikimi için ideal koşulları sağlamıştır.

Bu süreç, insan müdahalesine ihtiyaç duyulmadan gerçekleştirilmiş ve fidan dikimi işleminin verimliliği artırılmıştır.

Sonuç olarak, ArcMap uygulaması ile hazırlanan görev dosyası ve bu dosyanın mobil robot üzerindeki endüstriyel bilgisayara yüklenmesi, fidan dikiminde büyük bir kolaylık ve doğruluk sağlamıştır. Bu yöntem hem zaman tasarrufu sağlamış hem de iş gücü maliyetlerini azaltmıştır. Ayrıca, otonom robot teknolojisinin tarım sektöründe nasıl etkin bir şekilde kullanılabileceğine dair önemli bir örnek teşkil etmiştir.

Şekil 3.28’de otonom toprak burgu robotu ile çukur açma süreci adım adım gösterilmektedir.



Şekil 3.28. CBS tabanlı Otonom Toprak Burgu Robotu için **a)** uydu görüntüsünün alınması; **b)** uydu görüntülerinin coğrafi referanslama işlemi; **c)** çukur noktalarının mobil robota yüklenmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, toprak sıkışıklığını azaltarak tarımsal üretimde ürün verimi ile kalitesini artırmayı amaçlayan bir mobil robot tasarlanmıştır. Bu robot, noktadan noktaya otonom olarak hareket edebilmekte ve gerektiğinde bir joystick yardımıyla manuel olarak da kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen robot, GPS verilerini baz alarak tarla üzerindeki belirlenmiş noktalara ulaşmak üzere programlanmıştır. Sistem, otonom ve manuel olarak yönlendirilebilen bir mobil robot üzerinden toprağı işleyebilen bir toprak burgusuna sahiptir. Bu çerçevede, sistemin tüm mekanik, elektronik ve yazılımsal bileşenleri eksiksiz olarak tamamlanmıştır.

Mobil robotun tarla üzerindeki performansı ve doğruluğu iki aşamalı olarak test edilmiştir. İlk aşamada, mobil robotun navigasyon sonrası belirlenen hedef noktaya ulaştığı konumla hedef nokta arasındaki mesafe farkları ölçülmüştür. Bu ölçümler, robotun hedef noktaya varış hassasiyetini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, mobil robotun ulaştığı hedef noktalarda çukur açma işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler sonucunda elde edilen veriler, istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Böylece, mobil robotun navigasyon yöntemlerinin doğruluk düzeyleri, tüm çalışmayı temsil edecek şekilde belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen testlerin sonuçları, mobil robotun tarla üzerindeki çalışma şekli ve doğruluğu hakkında önemli bilgiler sunmuştur. İlk aşamada yapılan ölçümler, robotun hedef noktalara ne kadar hassas bir şekilde ulaştığını ortaya koymuştur. İkinci aşamada ise, robotun çukur açma işlemlerindeki performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen verilerin istatistiksel analizi, sistemin genel doğruluk düzeyini ve etkinliğini ortaya çıkarmıştır. Test işlemlerine ait detaylı sonuçlar, aşağıda sırasıyla sunulmuştur.

4.1. Mobil Robot Test İşlemleri

Mobil robotun tarla üzerindeki çalışma hassasiyetlerini belirlemek amacıyla bir dizi test işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu test aşamasında, mobil robotun düz bir hat üzerinde belirlenen hedef noktalara yaklaşım mesafeleri ölçülmüştür. Robot, önceden belirlenen güzergâh boyunca ilerlerken, her bir hedef noktaya ne kadar yakınlıkla ulaştığı dikkatle kaydedilmiştir. Bu ölçümler, robotun navigasyon sisteminin doğruluğunu ve hedef noktaya varış hassasiyetini değerlendirmek için kullanılmıştır. Elde edilen veriler, robotun hedef noktalara ne derece hassasiyetle ulaştığını ortaya koyarak, sistemin genel performansını belirlemede önemli bir rol oynamıştır. Bu sayede, robotun tarla üzerindeki operasyonel etkinliği ve doğruluğu hakkında değerli bilgiler elde edilmiştir.

4.1.1. Mobil robot teknik özellikleri

Geliştirilen mobil robotun maksimum hızı saatte 15.2 kilometre olup, batarya ve diğer sistemler dahil toplam ağırlığı yaklaşık 150 kg'dır ve 750 kg taşıma kapasitesine sahiptir. Üzerindeki yazılım sayesinde her 20 ms'de bir açı ve mesafe kontrolü yapabilmektedir. Kullanılan GPS alıcısı, robotun kapalı hava koşullarında bile verimli çalışmasına imkân tanımaktadır. Ayrıca, robotun enerji tüketimi ve çalışma süresi hesaplamalarına göre, meyve bahçesi koşullarında 250 watt ve 500 watt gücündeki motorlar arasında geçiş yaparak kesintisiz çalışabilmektedir. Diğer tüm bileşenlerin sürekli aktif olduğu bu şartlarda, robotun toplam çalışma süresi yaklaşık 3,53 saat olarak

hesaplanmış ve bu süre zarfında 270 adet fide çukuru açtığı belirlenmiştir. Bu veriler, robotun performansını ve dayanıklılığını değerlendirmek açısından önemli bir göstergedir.

4.2. Toprak burgusu çukur açma işlemi

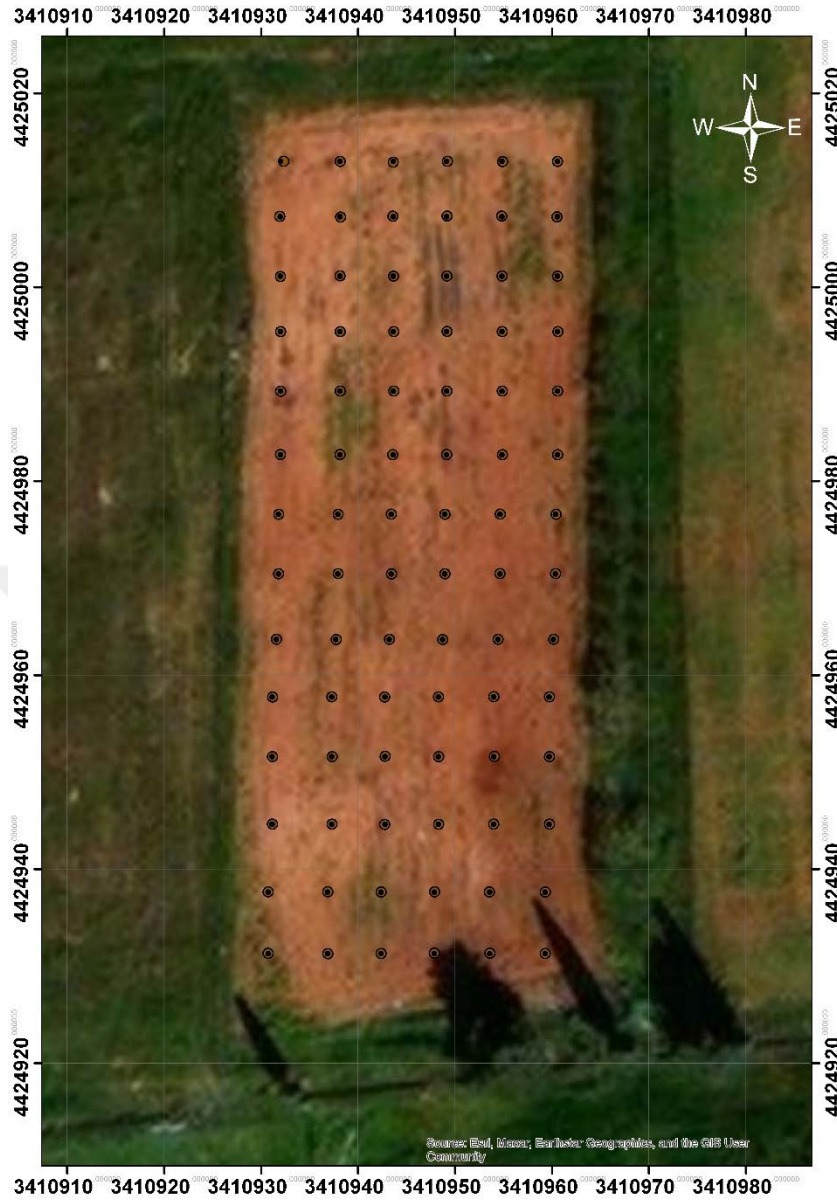
Mobil robot navigasyonunda kullanılan yazılımın ana amacı, XTE'yi (Cross-Track Error) en aza indirerek robotun hedef noktaya tam olarak yaklaşmasını sağlamaktır. XTE, genel 2D konum hatası istatistiklerini tahmin etmek veya karşılaştırmalar yapmak için kullanılmaktadır (Sharp ve Yu 2012). XTE, robotun gerçek konumu ile istenen hedef konumu arasındaki Öklid mesafesidir:

$$XTE = \sqrt{(X_R - X_{TP})^2 + (Y_R - Y_{TP})^2} \quad (4.1)$$

Denklemden, mobil robotun enlem ve boylam değerleri X_R ve Y_R ile temsil edilmektedir. İstenen hedefin enlem ve boylam değerleri ise X_{TP} ve Y_{TP} ile gösterilmektedir. Her bir delme süreci için XTE değerlerinin standart sapmaları ve standart hataları hesaplanmıştır. Sistemin genel başarısını değerlendirmek amacıyla 84 nokta için elde edilen XTE verileri analiz edilmiştir. Görselleştirme amacıyla ArcGIS 10.5 yazılımı kullanılmıştır.

4.2.1. Çukur açma haritalarının oluşturulması

İlk olarak bahçenin dijital bir görüntüsü ArcMap programına aktararak fidan çukurlarının yerleri belirlenmiştir. Ardından, çukurların yerleri hem yatay hem de dikey yönde 6 m aralıklarla işaretlenmiştir (Şekil 4.1). Son olarak, fidan çukurlarının koordinat bilgileri görüntüden çıkarıldıktan sonra bir veri tabanı tablosu oluşturulmuştur. Mobil robotun açılacak çukurlara otonom olarak yönlendirilmesi için bu veri tabanı tablosu görev dosyası olarak kullanılmıştır.

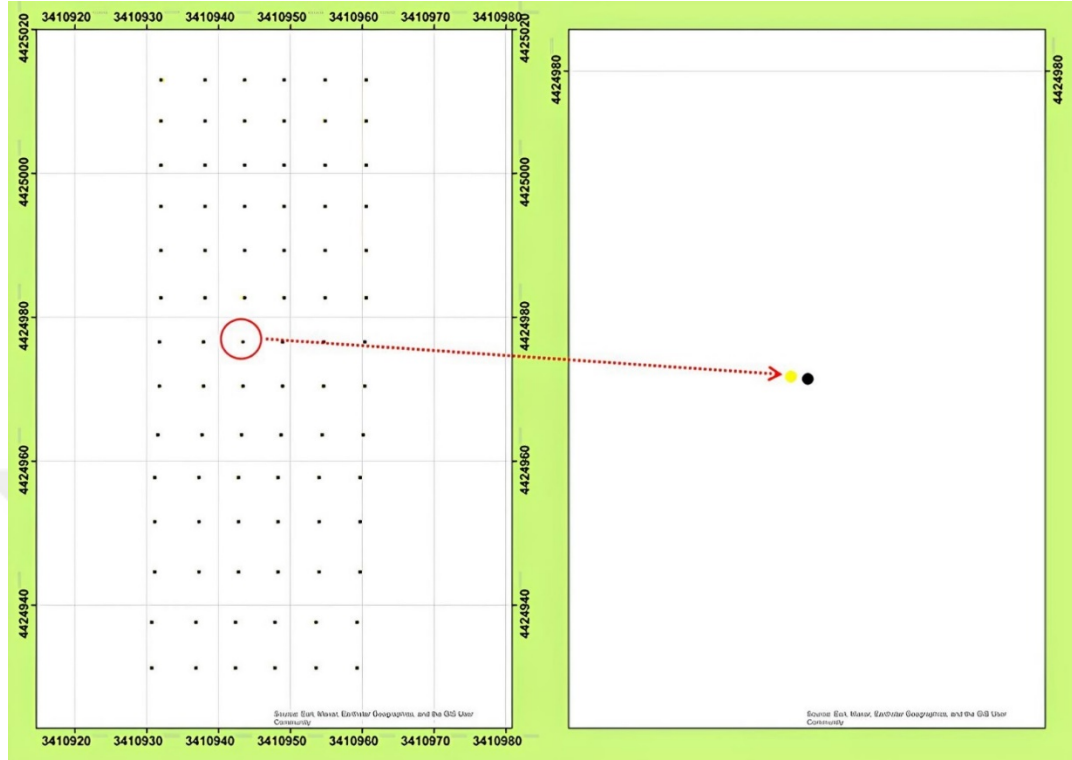


Şekil 4.1. ArcMap ile oluşturulan harita

4.2.2. İş dosyası ile açılan çukurların karşılaştırmalı analizi

GIS tabanlı otonom burgu robotunun deneysel çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama, fidan dikimi için kazılması gereken çukurların yerlerini bulmak amacıyla ofis ortamında ArcMap uygulaması kullanılarak mobil robot için görev dosyasının hazırlanmasını içermektedir. İkinci aşamada ise hazırlanan görev dosyası mobil robot bilgisayarına yüklenmekte ve robot, otonom olarak hedef konumlarına birer birer giderek ve çukurları açmaktadır. Çalışma alanında, görev dosyası için 6×6 m aralıklarla toplam 84 fidan çukur konumu belirlenmiştir. Hedef konumlar ve mobil robotun çukur açtığı konumlar Şekil 4.2'de gösterilmektedir. Zayıf GPS sinyali nedeniyle herhangi bir veri kaybı yaşanmamıştır. Mobil robotun çalışma süresi yaklaşık 3.53 saattir. Bu süre zarfında robot, yaklaşık 270 fidan çukuru açabilmektedir. Burada sunulan hesaplamalar maksimum hızlar göz önüne alınarak yapılmıştır. Arazi çalışmasında motor

hızları yarıya düşürülmüştür. Bu koşullar altında, mobil robotun kesintisiz olarak yaklaşık 5 saat boyunca çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Hedef konumlar ve mobil robotun çukur açtığı konumlar

Çukur açma işlemi için çalışma alanındaki mobil robotun görüntüleri Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Açılan çukurlar yaklaşık olarak 20 cm genişliğinde ve 30 cm derinliğindedir. Ancak, çukur açma mekanizmasına farklı çaplarda burgular eklemek, daha derin ve geniş çukurların açılmasını sağlamaktadır.



Şekil 4.3. Çukur açma işlemi için çalışma alanındaki mobil robotun görüntüleri

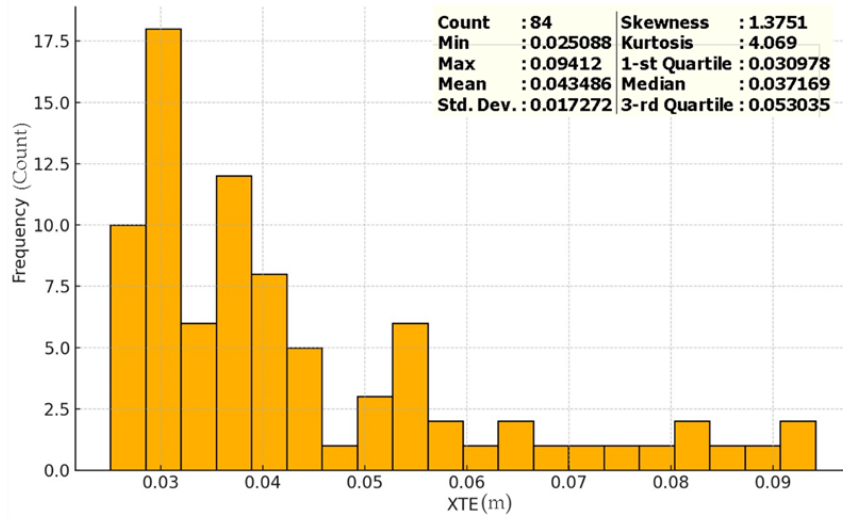
Açılan çukurların görüntüleri Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Açılan çukurların görüntüleri.

Veri görselleştirmesi genellikle histogramlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Histogramlar, veri koleksiyonunun her bir değerinin ne sıklıkla görüldüğünü gösteren grafiksel gösterimleridir. Mobil robotun çukur açtığı yer ile hedef kazma noktası arasındaki XTE değerlerinin histogramı Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Toplam 84 nokta için minimum ve maksimum XTE değerleri sırasıyla 2.41 cm ve 9.41 cm olarak hesaplanmıştır. Verilerin standart sapması 1.73 cm, ortalaması ise 4.35 cm olarak hesaplanmıştır. XTE değerlerinin çoğunluğunun 2.51 cm ile 5.96 cm arasında sıkıştığı görülmektedir. Veri setlerimizin histogram üzerindeki şeklini bilmek önemlidir. Pozitif ya da sağa eğimli grafiklerde kuyruk sağa doğru çekilmiş gibi görünür. Pozitif eğimli veriler, aralığın alt ucunda çok sayıda değer bulunduğunu ve daha yüksek değerlerin nadiren görüldüğü durumlarla karakterize edilir. Bu da verilerin ortalamasının genellikle medyandan daha yüksek olduğunu ve dağılımın simetrik olmadığını gösterir. Şekil 4.5 incelendiğinde, histogramın pozitif ya da sağa eğimli olduğu görülmektedir. Bu veri seti için eğiklik 1.38 ve basıklık (kurtosis) 4.07 olup, orta dereceli bir eğiklik ve basıklık göstermektedir. XTE'nin en büyük frekanslarının 2.51–5.96 cm aralığında olduğu ve sağa doğru daha uzun bir kuyruk olduğu görülmektedir. Histogramda yansıyan bu veri karakteristiği, mobil robotun konum hatalarının hangi noktalarda arttığını anlamak açısından önemlidir.

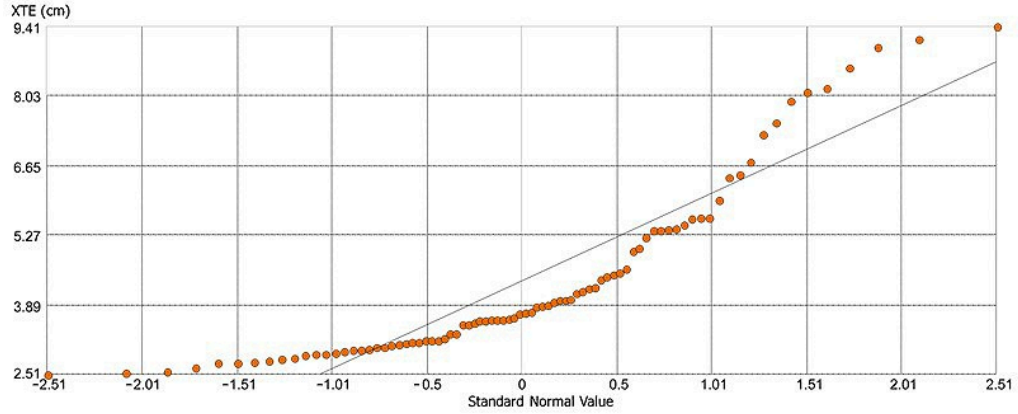
Histogramın x eksenini, mobil robotun XTE değer aralığını temsil etmektedir. Y eksenini ise XTE değerlerinin frekansını ya da sayısını temsil etmektedir.



Şekil 4.5. Mobil robotun XTE değerlerinin histogramı.

Veri setinin teorik bir dağılımdan gelip gelmediğini belirlemek için kullanabileceğimiz grafik türlerinden biri de kantil-kantil (Q-Q) grafiğidir. Bir veri setinin tek değişkenli normalliği, normal Q-Q grafiğindeki noktaların konumlarına bakılarak belirlenebilmektedir. Veriler normal dağıldığında, noktalar 45 derecelik bir referans çizgisine düşerler. Veriler normal dağılıma uymuyorsa, noktalar bu referans çizgisinden saparlar. Aşağıda yer alan Şekil 4.6'daki normal Q-Q grafiğinde veri setine ait karşılık gelen kantil değerleri y ekseninde, standart normal dağılımın kantil değerleri ise x ekseninde gösterilmiştir. Noktaların neredeyse 45 derecelik referans çizgisine yakın olduğu görülmektedir. Ana sapma, yüksek XTE değerlerinde meydana gelmektedir. Sağ eğik veriler, normal Q-Q grafiğinde içbükey bir eğri olarak görünmektedir. X eksen, standart normal dağılımın teorik kantil değerlerini temsil etmekte ve bu eksen, standart normal dağılım için beklenen minimum ve maksimum çeyrek değerleri olan -2.51 ile $+2.51$ arasında değerler içermektedir. Y eksen ise gözlemlenen veri setinin kantil değerlerini temsil etmektedir. Bu çalışmada, veri değerleri yaklaşık olarak 2.51 cm ile 9.41 cm arasında değişmektedir. Grafikte gözlemlendiği gibi, çoğu nokta çizgiye yakındır ve bu da veri setinin büyük ölçüde normal dağılıma uygun olduğunu göstermektedir. Ancak uç noktalarda sapmalar vardır. Bu sapmalar, veri setinin uçlarındaki aşırı değerleri veya farklı davranışları, yani veri setinin uç noktalarında olası uç değerlerin ya da normal dışı davranışların varlığını işaret etmektedir.

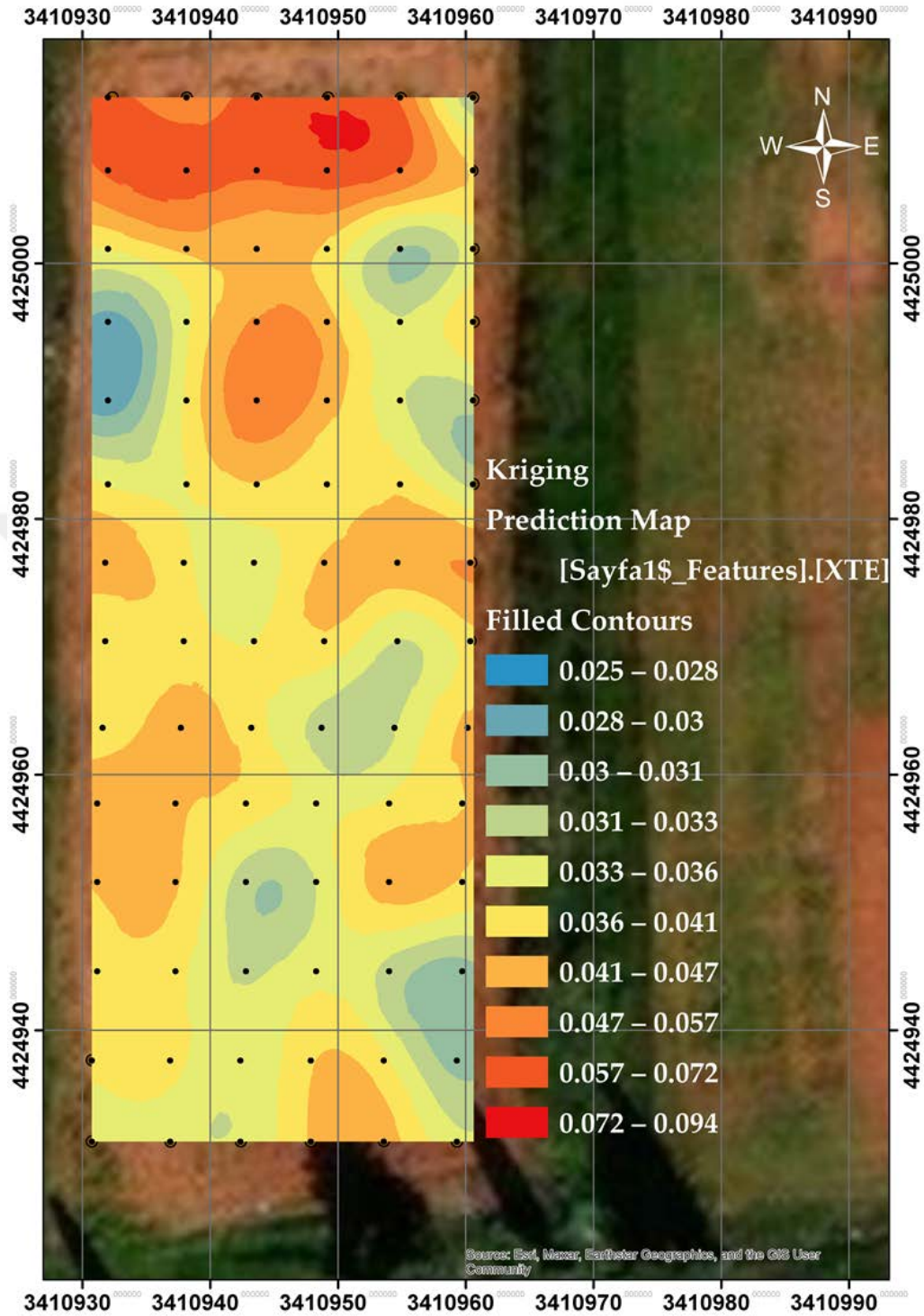
Aşağıdaki Q-Q grafiği, dikey eksenindeki XTE değerlerini yatay eksenindeki istatistiksel bir popülasyonla karşılaştırır.



Şekil 4.6. XTE değerlerinin normal Q-Q grafiği

Araştırma alanındaki farklılıkları anlamak için basit kriging yöntemi kullanılmıştır. Basit kriging, sıradan kriging'e göre daha az karmaşıktır, ancak tüm veri setinin ortalamasını alarak daha düzgün bir sonuç üretmektedir. Genel eğilimler çıkarılmamış, veri değerleri düzenlilik sağlamak için dönüştürülmemiş veya kümelenmemiştir. XTE'nin mekânsal dağılımı Şekil 4.7'de gösterilmektedir. İlgili şekil, incelenen alanın önemli bir kısmında XTE'nin 4.7 cm'den az olduğunu göstermektedir. Bu, GIS tabanlı otonom toprak delme robotunun çalışma alanında makul XTE hatalarıyla işlev görebileceğini göstermektedir.

Aşağıdaki mekânsal dağılım haritası, XTE değerleri ile çalışma alanındaki tüm konumlar arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir.



Şekil 4.7. XTE'nin mekânsal dağılımı

Verimlilik, tarımsal robotik sistemlerin performansının kritik bir göstergesidir. Geliştirilen CBS tabanlı otonom toprak burgu robotu, verimlilik gereksinimlerini karşılayıp karşılamadığını belirlemek için değerlendirilmiştir. Robotun sürekli çalışma süresi, batarya kapasitesi ve enerji verimliliği tarafından belirlenen ana bir metriktir. Her bileşenin çektiği akım ve çalışma süresine dayanarak, robot tam şarjlı akülerle yaklaşık 3.53 saat kesintisiz çalışabilmektedir. Ayrıca, çukur açma ve yeniden konumlandırma

dahil olmak üzere her çukur için harcanan ortalama süre 47 saniyedir. Görev başına tüketilen enerji miktarı olarak tanımlanan enerji yoğunluğu da göz önünde bulundurulmuştur. Robotun enerji verimliliği, bileşenlerin güç tüketimi ve genel sistem tasarımı dikkate alınarak optimize edilmiştir. Robotun toplam güç tüketimi, dört adet 250 W motor ve bir adet 500 W motorun yanı sıra diğer bileşenlerin enerji gereksinimleri hesaplanarak belirlenmiştir. Toplam enerji tüketimi 958.695 A.s olarak belirlenmiştir. İki adet 12V-72 Ah aküden oluşan güç kaynağı sistemi, robotun uzun süre kesintisiz çalışmasını sağlamaktadır.

Meyve bahçesi mekanizasyon teknolojilerinin günümüz taleplerine uyacak şekilde değiştirilmesi ihtiyacı, yeni ve verimli makinelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Yoğun meyve bahçeleri, büyük ölçekli meyve üretimi ve otonom mekanize işlemler için elverişli koşullar sağlamaktadırlar. Çizelge 4.1'de, sıralar arasındaki mesafenin 2.5 ila 6 m arasında değiştiği, bir sıra içindeki ağaçlar arasındaki mesafenin ise dikim yoğunluğuna ve kültür tipine bağlı olarak 0.5 ila 5.5 m arasında değiştiği görülmektedir. Bu çalışmada, fidan çukurları için ağaçlar arasındaki yatay ve dikey mesafe altı metre olarak belirlenmiştir. Bahçede dikilecek ağaç türüne bağlı olarak, kullanıcı bu önceden belirlenmiş mesafeyi ArcMap yazılımında ayarlayabilmektedir. Bir meyve bahçesi kurmak için şu aşamaların tamamlanması gerekmektedir: dikim materyalinin seçilmesi, mesafelerin belirlenmesi, alan işaretleme, çukurların kazılması ve ağaçların dikilmesi. Bu süreçte iki aşamada mekanizasyona ihtiyaç vardır: çukurların kazılması ve ağaçların dikilmesi. Bu çalışma, CBS tabanlı otonom burgu robotuna odaklanmaktadır.

Çizelge 4.1. Ağaç türüne göre dikim yoğunluğu ve mesafeler

Ağaç Türü	Sıralar Arası Mesafe (m)	Sıra İçi Mesafe (m)
Elma	2.5–6	0.8–5
Elma	3.5–5	1.5–4.5
Erik	5–6	3.5–4.5
Kayısı	5–6	3.5–5.5
Şeftali	4.5–5.5	3–4
Kiraz	5–7	4–5.5
Vişne	4–6	2–4.5
Frenk Üzüümü	2.8–3	1–1.2
Ahududu	2.5	0.5
Böğürtlen	2.5	1.5–1.8
Ceviz	4–5	3–3.5

Ağaç meyvelerinin üretimine yönelik otomatik yöntemler üzerine yapılan araştırmaların çoğu, budama ve hasat işlemlerine odaklanmaktadır. Literatürde, meyve bahçesi kurulumunda çukur kazma işlemini gerçekleştiren CBS tabanlı otonom bir robot çalışmasına rastlanmamıştır. Yeni bir meyve bahçesi kurarken mekanize işlemler konusu dikkatle ele alınmalı, bahçe otonom sistemler ve ilgili destekleyici altyapılarla donatılmalıdır (Lei vd. 2023). Bu nedenle, bu çalışma yeni bir bahçe kurulurken ağaçların nerelere dikilmesi gerektiğini belirlemek açısından önemlidir. Ağaçların gerçek konumu bu teknoloji ile önceden belirlendiğinden, sonraki dikim ve bakım işlemleri için otonom makineler kullanılabilir.

Mekanizasyon, tarımda görevlerin zamanında tamamlanmasını sağladığı ve birim alan başına maliyetleri düşürdüğü için büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde meyve ağacı yetiştiriciliğinin hızla gelişmesiyle birlikte, bahçecilik uygulamaları büyük ölçüde çeşitli mekanik aletlerin kullanımını gerektirmektedir. Bahçecilikte en önemli araçlardan biri çukur açma makinesidir. Fide dikimi için çukur hazırlama süreci, bahçecilikte mekanik fidan dikiminde toplam gereken zamanın yaklaşık %30'unu oluşturmaktadır (El-Gendy vd. 2009). Bu oran, toplam süreçte oldukça büyük bir zaman dilimini kapsamaktadır. Geleneksel toprak kazma yöntemi hem zaman alıcı hem de fiziksel olarak yorucudur ve bu durum operatörün hızla yorulmasına neden olabilir. Çukur açma makineleri başlıca iki ana kategoriye ayrılırlar: el burguları ve motorlu burgular. Motorlu burgular bir motor veya matkapla çalışırken, el burguları insan gücüne ihtiyaç duyar ve daha küçük projeler için uygundur. Motorlu burgular arasında traktör burguları, benzinle çalışan burgular ve elektrikli burgular bulunmaktadır. Bahçecilikte kullanılan tüm bu çukur açma makinelerinin temel amacı iş gücünü azaltmak ve bahçecilik verimliliğini artırmaktır (Kaur vd. 2023). Benzinle çalışan toprak burgularıyla ilgili en büyük endişelerden biri taşıma zorluğudur; ağırlıkları nedeniyle taşınmaları çok zor olup, ayrıca çalışanların sağlığına zararlı olabilecek çok miktarda toz üretirler. Tüm bu açıklamalar değerlendirildiğinde, otonom bir çukur açma mobil robotunun geliştirilmesinin işçilik maliyetlerini düşürmek ve birim zaman başına verimliliği artırmak gibi önemli faydalar sağlayacağı açıktır.

T-saplı manuel çukur açma makineleri insan gücüne dayanmakta ve bir çukur kazmak ortalama olarak 3 ila 5 dakika sürebilmektedir. Motorla çalışan ve bir operatör tarafından yönlendirilen yarı otomatik makinelerde ise bu işlem çukur başına yaklaşık 1–2 dakika sürmektedir. Buna karşılık, geliştirilen otonom robot bir çukuru sadece 47 saniyede açabilmekte, bu da çok daha yüksek bir verimlilik sağlamaktadır. Enerji tüketimi açısından, manuel makineler doğrudan enerji tüketmezken, benzinli motorlu yarı otomatik makineler 2-3 HP (1,5-2,2 kW) motor gücünde saatte yaklaşık 1 L yakıt tüketmektedir. Otonom robot ise dört adet 250 W motor ve bir adet 500 W motor ile toplamda 1.5 kW güç kullanmakta olup, çukur açma işlemi için 2.1 HP gücünde bir benzinli motor ile çalışmaktadır. Bu yapılandırma, robotu mevcut yarı otomatik çözümlere kıyasla daha dengeli ve enerji verimliliği açısından daha avantajlı kılmaktadır. Hassas çukur açma ve GPS destekli navigasyonda tatmin edici performans sergileyen otonom robot, tam şarjlı akülerle yaklaşık 3.53 saat kesintisiz çalışabilmektedir. Sonuç olarak, CBS tabanlı otonom burgu robotu, iş gücü ve zaman açısından piyasadaki mevcut çözümlere göre çok daha yüksek bir verimlilik sunmaktadır.

Piyasada manuel, yarı otomatik ve traktör üç nokta bağlantı tipine sahip toprak burguları bulunmaktadır. Bir toprak burgusu elle, elektrik motoruyla, içten yanmalı bir

motorla ya da traktör veya başka bir araçtan güç aktarma sistemiyle çalıştırılabilir. Özellikle çok sayıda çukur açılması gerektiğinde, yoğun iş gücü, işletme maliyetleri ve zaman açısından hangi tür toprak burgusu sisteminin kullanılacağı kritik önem taşımaktadır. Manuel, yarı otomatik ve geliştirdiğimiz mobil robotun karşılaştırmalı performansları tarla kapasitesine dayalı olarak değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda manuel, yarı otomatik ve mobil robot tabanlı otonom toprak burgusu makineleri için tarla kapasitesi değerleri sırasıyla 11.62 çukur/saat, 30.04 çukur/saat ve 70.38 çukur/saat olarak elde edilmiştir. Elde edilen değerler, mobil robot tabanlı otonom toprak burgusu makinesinin, diğer iki makinadan daha hızlı çukur açtığını ve insan gücüne ihtiyaç duymadığını göstermektedir. Bu çalışma, farklı tarımsal yönetim yöntemleri ve maliyet analizleri gibi unsurları içerecek şekilde zenginleştirilebilir.

Otonom tarım robotları ve yönlendirme sistemleri, birçok araştırma çalışmasının konusu olmuştur. Tarım robotlarının navigasyonu ile ilgili en kritik faktör konum doğruluğu, bir başka deyişle mobil robotun istenen konuma ulaşma doğruluğudur. Stombaugh vd. (1999), yüksek hızlı mobil robotların konum doğruluğunda yanal konum hatasının 16 cm (yüzde 95 güven) olduğunu bildirmişlerdir. Nagasaka vd. (2004), otonom pirinç dikim robotunun istenen rotadan en fazla 12 cm sapma gösterdiğini ve robotun konum doğruluğunun 1 metreden az olduğunu rapor etmişlerdir. Ünal ve Topakcı (2015), hassas tarım için uzaktan kumandalı ve GPS ile yönlendirilen bir otonom robot tasarlamışlardır. Yazarlar, doğrusal hedef nokta hassasiyetinin 10 ila 12 cm, dağıtılmış hedef nokta hassasiyetinin ise 15 ila 17 cm arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde konum hassasiyetinin 0,1 ila 1 m arasında değiştiği anlaşılmaktadır. Çalışmamızda ise minimum ve maksimum XTE değerleri sırasıyla 2.41 cm ve 9.41 cm olarak gözlemlenmiştir. Bu, çalışmamızın sonuçlarının literatürdeki diğer sonuçlardan daha iyi olduğunu göstermektedir.

Her bahçe yönetim operasyonu, aktüatörlerin bahçede hareket edebilmesi için mobil bir platforma ihtiyaç duymaktadır. Bahçede doğru bir mobil platform navigasyonu gereklidir ve aynı zamanda ağaçlara veya meyvelere yönelik manipülasyonları da göz önünde bulundurmalıdır (Verbiest vb. 2021). Literatürde, önceden hazırlanmış haritalar kullanarak bahçe ortamlarında mobil sistemlerin navigasyonu üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır (Paton vd. 2017; Gu vd. 2018; Kragh ve Underwood 2020). Dong vd. (2020), RGB-D kameralar kullanarak bir bahçenin semantik haritasını oluşturmuşlardır. Yazarlar, bu haritaların yalnızca koordinatlarla sınırlı olmadığını bildirmişlerdir. Ancak, bu teknolojiyi değerlendirmek için herhangi bir robotik sistem kullanılmamıştır. Han vd. (2022), bahçeler için otonom sürüş yolu tanımlama tekniklerinin dört kategoride sınıflandırılabilirliğini belirtmişlerdir. İlk yaklaşım, otonom sürüş yolu oluşturmak için hava görüntülerinin coğrafi referanslandırılmasıdır (Gonzalez-de-Santos vd. 2017). Ancak bu sistemin dezavantajı, otonom sürüş yolu oluşturmak için ek maliyetlerin oluşmasıdır. İkinci yaklaşım, otonom sürüş rotası oluşturmak için öncelikle meyve ağacı sıralarının sonlarını tanımlamayı içerir (Bayar 2013). Fakat bu sistemin dezavantajı, LiDAR veya kameranın performansına bağlı olarak yanlış konum elde edildiğinde yanlış bir yol oluşturulabilmesidir. Üçüncü yaklaşım, bahçenin haritasını oluşturmak için ağaç gövdelerini tespit etmek amacıyla kamera ve/veya LiDAR kullanmayı içermektedir (Qin vd. 2022). Ancak kötü hava koşulları veya aydınlatma, LiDAR veya kameranın yanlış veri toplamasına neden olabilmekte bu da haritada nesne yerleşimlerinin hatalı bir şekilde haritalanmasına yol açabilmektedir. Dördüncü yaklaşım, otonom sürüş rotası için arazi

çalışmasından önce konum verilerini elde etmeyi içermektedir. Ancak bu sistem, sadece yolun konumunu bildiği fakat ağaçları bilmediğinden otonom sürüş sırasında çarpışma riski taşımaktadır. Önerdiğimiz sistem, dördüncü yöntemle benzerlik gösterse de bazı avantajları vardır. İlk avantaj, bahçedeki ağaçların konumlarının mobil robot tarafından bilinmesidir. İkinci olarak, bilinen ağaçların konumlarına bağlı olarak çeşitli rota algoritmaları oluşturma potansiyeline sahiptir.

CBS tabanlı otonom burgu robotu, hassas çukur açma işlemleri için gerekli olan santimetre düzeyinde doğruluk sağlayan bir RTK-GPS sistemi ile donatılmıştır. Dijital pusula, robotun hareketlerini doğru bir şekilde yönlendirerek genel doğruluğunu artırmaktadır. Ayrıca, 2.1 HP gücünde bir benzin motoru ile çalışan toprak burgu makinesi, farklı toprak türleri ve koşullarında tutarlı çukur açma performansı sunmaktadır. Robotun tasarımı, bahçe kurulumunda gereken yüksek hassasiyet ve kalite standartlarını karşılayacak şekilde optimize edilmiştir.

CBS tabanlı otonom burgu robotu için gereken toplam başlangıç yatırımı yaklaşık 5000 ABD dolarıdır. Bu başlangıç maliyeti yüksek gibi görünse de robot, uzun vadede başlangıç harcamalarını fazlasıyla telafi edebilecek pek çok avantaj sunmaktadır. Operasyonel verimliliği önemli ölçüde artırarak ve manuel iş gücü ihtiyacını azaltarak, robot yalnızca işçilik maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda bahçe kurulumlarının hassasiyetini de artırır. Bu hassasiyet, fidanların en iyi şekilde büyümesi ve sağlıklı gelişimi için kritik öneme sahiptir ve bu da daha yüksek ürün verimliliğine katkıda bulunur. Ayrıca robotun kaynakları verimli kullanması ve otomasyon yetenekleri, zamanla operasyonel giderleri azaltmaya yardımcı olur. Bu avantajların bir araya gelmesi, başlangıç yatırımının geri kazanılmasını sağlar ve kullanıcılara sürekli ekonomik faydalar sunar, bu da bu yenilikçi teknolojinin uzun vadede mali açıdan mantıklı bir yatırım olmasını sağlar.

Bu çalışmada, CBS tabanlı otonom toprak burgu robotunun geliştirilmesi, bahçe kurulum süreçlerinin verimliliğini ve hassasiyetini artırmayı amaçlamıştır. Robota, doğru navigasyon için yüksek hassasiyetli RTK-GPS ve dijital pusula başarıyla entegre edilmiş, çukur açma noktalarını haritalamak için Landsat görüntüleri ve ArcGIS yazılımı kullanılmıştır. Saha testleri, robotun operasyonel verimlilik, hassasiyet ve işçilik maliyetlerini azaltma konusunda önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Manuel ve yarı otomatik sistemlerle karşılaştırıldığında, robotumuz tamamen otonom, yüksek hassasiyetli bir çözüm sunarak bahçe kurulum süreçlerini iyileştirmekte ve daha iyi ürün sonuçları elde edilmesine olanak tanımaktadır. Bu sonuçlar, belirtilen araştırma hedeflerine ulaşıldığını, teknolojik sürecin yüksek kaliteli bir şekilde uygulandığını ve çözümümüzün mevcut yöntemlere göre avantajlarını doğrulamaktadır.

5. SONUÇLAR

Tarım robotları pazarı hızla büyümekte olup, önümüzdeki yıllarda önemli büyüme kilometre taşlarına ulaşması beklenmektedir. 2024 itibarıyla pazar değeri yaklaşık 13.5 milyar ABD doları olarak tahmin edilmektedir. Bu pazarın yıllık bileşik büyüme oranı (CAGR) %24.3 olarak öngörülmekte olup, 2028'e kadar yaklaşık 40.1 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir. Bu dinamik pazarda, meyve yetiştiriciliği sektörünü ileriye taşımak için birçok robotik araştırma yapılmaktadır.

Bahçelerde fidan çukurları açmak için kullanılan robotik sistemler, yönetim doğruluğunu ve verimliliği artırma, iş gücünü azaltma ve daha yüksek ürün verimleri sağlama açısından büyük vaatler sunmaktadır. Çeşitli tasarım ve uygulamalar, yüksek hassasiyet ve otonomi sergileyerek robotik sistemleri modern tarımın değerli araçları haline getirmektedir. Robotik sistemler genellikle otonom navigasyon, gelişmiş algılama teknolojileri ve hassas kontrol mekanizmaları ile insan iş gücüyle yapılan görevleri yerine getirmektedir.

Mobil robotlarla bahçecilik otomasyonu sürekli gelişen bir alandır. Mekanize ve akıllı operasyonlar, özellikle bahçelerin kurulumu sırasında giderek daha yaygın hale gelmektedir.

Otonom mobil robotların bahçelerde çukur açmak için kullanımı konusunda henüz yayımlanmış bir çalışma bulunmamaktadır. Bu bağlamda, CBS entegreli otonom toprak burgu robotu ile bahçe dikim verimliliğini optimize etmeye yönelik yeni bir tasarım bu çalışmada sunulmuştur.

Önerilen CBS tabanlı otonom toprak burgu robotu, bahçelerde çukur açma taleplerini karşılamaktadır. Geliştirilen robot, mevcut çözümlere kıyasla verimlilik ve enerji tüketimi açısından önemli iyileşmeler göstermektedir.

Detaylı hesaplamalar, robotun tam şarjla yaklaşık 3.53 saat kesintisiz çalışabildiğini, saatte ortalama 76 çukur açtığını ve 8 saatlik bir iş gününde 608 çukura kadar ulaşabildiğini göstermektedir. Bu yüksek verimlilik, çukur başına ortalama 47 saniye delme süresiyle elde edilmekte, manuel ve yarı otomatik yöntemlere kıyasla iş gücü ve zaman ihtiyacını önemli ölçüde azaltmaktadır.

Ayrıca, bilinen ağaç pozisyonlarına dayalı olarak farklı bahçe operasyonları için çeşitli rota yöntemleri oluşturma potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, meyve üreticilerinin, iş gücü yoğun ve zaman alıcı olan fidan çukuru açma görevini otomatikleştirmek için bu robotu kullanmaları gerektiğini göstermektedir; ayrıca bu robotun bahçecilik sektörüne yeni faydalar sunacağı ve geniş bir etki potansiyeline sahip olduğunu işaret etmektedir.

6. KAYNAKLAR

- Abbott, E and Powell, D. 1999. Land-vehicle navigation using GPS. in *Proceedings of the IEEE*, 87 (1): 145-162.
- Angeles, J. 2003. An innovative drive for wheeled mobile robots. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM* (1), 155-162
- Arad, B. et al. 2020. Development of a sweet pepper harvesting robot. *Journal of Field Robotics*, 37(6): 1-13
- Barut, Z.B. 2005. Dikim Makinaları. (1), Adana, ss. 97-111.
- Bajjali, W. 2018. *ArcGIS for Environmental and Water Issues*. Springer, Cham, pp. 67-87.
- Bayar, G. 2013. Long distance autonomous trajectory tracking for an orchard vehicle. *Industrial Robot: An International Journal*, 40(1): 27-40.
- Beyerle, G., Ramatschi, M., Galas, R., Schmidt, T., Wickert, J. ve Rothacher, M. 2009. A data archive of GPS navigation messages. *GPS Solutions*, 13(1): 35-41.
- Blaser, S., Meyer, J., Nebiker, S., Fricker, L. and Weber, D. 2020. Centimetre-accuracy in forests and urban canyons – combining a high-performance image-based mobile mapping backpack with new georeferencing methods. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, V-1-2020: 333-341.
- Bruzzzone, L., Nodehi, S.E. and Fanghella, P. 2022. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review. *Machines*, 10(8).
- Burger, B. et al. 2020. A mobile robotic chemist. *Nature*, 583(7815): 237-241.
- Burt, J.E., White, J., Allord, G., Then, K.M. and Zhu, A.X. 2020. Automated and semi-automated map georeferencing. *Cartography and Geographic Information Science*, 47(1): 46-66.
- Carpentier, J. and Mansard, N. 2018. Multicontact Locomotion of Legged Robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(6): 1441-1460.
- Classen, R.J. 1977. An introduction to geographic information systems. *Computers & Industrial Engineering*, 1(2): 131-138.
- Correll N. et al. 2009. Building a distributed robot garden. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, pp. 1509-1516.
- Dang, S., Huang, H. and Li, X. 2023. About the Parsing of NMEA-0183 Format Data Streams in GPS. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* 153: 1282-1289.
- Dawood Salman, A., Abdullatif Abdelaziz, M. and Dawood Salman, A. 2020. Mobile Robot Monitoring System based on IoT. *Journal Of Xi An University Of Architecture & Technology*. 12(3):5438-5447.
- Dean, E., Taylor, M.J., Francis, H., Lisboa, P., Appleton, D. and Jones, M. 2017. A

- Methodological Framework for Geographic Information Systems Development. *Systems Research and Behavioral Science* 34(6), 759-772.
- Dong, W., Roy, P. and Isler, V. 2020. Semantic mapping for orchard environments by merging two-sides reconstructions of tree rows. *Journal of Field Robotics*, 37: 97–121.
- El-Gendy, H., Abd El-Halim, S., Morghany, H. and Aboukarima, A. 2009. Evaluating performance of a post hole digger. *Journal of Soil Science and Agricultural Engineering*, 34: 5783–5793.
- German, J.C.H., Alarcon, J.L.A. ve Gardini, S.R.P. 2023. Kinematic Modeling of a Mobile Robot with Four Tractor-Type Wheels with Independent Electric Drive. İçinde: *Proceedings of the 2023 IEEE 30th International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing, INTERCON 2023*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Gerrish, J.B., Fehr, B.W., Van Ee, G.R. and Welch, D.P. 1997. Self-steering tractor guided by computer vision. *Applied Engineering in Agriculture*, 13(5): 559–563.
- Giergiel, M., Buratowski, T., Niestój, P. and Waclawski, M. 2014. The Construction of a Biomimetic Mobile Underwater Robot. *Solid State Phenomena*, 210: 309-319.
- Gilblom, E.A. and Sang, H.I. 2020. Using Geographic Information Systems in Educational Research: A Beginner's Exercise. In: Kennedy, E. and Qian, Y. (Eds.), *Advancing Educational Research with Emerging Technology*. IGI Global, pp. 173-210.
- Glazer, B.G. 1978. GPS Receiver Operation. *Navigation*, 25(2): 173-178.
- Godzhayev, Z.A., Agaeva, G.Z., Grishin, A.P., Pardaev, G.A., Grishin, A.A. and Agaeva, G.A. 2015. Development prospects of robotic technologies in plant cultivation. *Tractors and Agricultural Machinery*, 82(12): 42-45.
- Gonzalez, J.A. 2017. Geographic Information Systems and Geomatics. In: Pelton, J.N., Madry, S. and Camacho-Lara, S. (Eds.), *Handbook of Satellite Applications*. Springer, pp. 1117-1135.
- Gonzalez-de-Santos, P. et al. 2017. Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agriculture*, 18: 574–614.
- Goodchild, M.F. 2009. Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1): 3-9.
- Grimstad, L. and From, P.J. 2017a. The Thorvald II agricultural robotic system. *Robotics*, 6(4): 24.
- Grimstad, L. and From, P.J. 2017b. Thorvald II - a Modular and Re-configurable Agricultural Robot. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1): 4588–4593.
- Gu, Y. et al. 2018. Cataglyphis: An autonomous sample return rover. *Journal of Field Robotics*, 35: 248–274.
- Han, J.-H., Park, C.-H., Jang, Y.Y., Gu, J.D. and Kim, C.Y. 2022. Performance Evaluation of an Autonomously Driven Agricultural Vehicle in an Orchard Environment. *Sensors*, 22(1): 114.

- Hanebeck, U.D., Saldic, N. and Schmidt, G. 1999. Modular wheel system for mobile robot applications. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, pp. 17-22.
- Henkel, P. 2011. Reduction and Optimization of Almanac Transmission for GNSS Satellites.
- Ho, T. and Lee, S. 2012. Design of a Multi-Locomotion Underwater Robot. *Advanced Materials Research*, 488-489: 1732-1736.
- Holmes, P., Full, R. J., Koditschek, D., and Guckenheimer, J. 2006. The dynamics of legged locomotion: Models, analyses, and challenges. *SIAM review*, 48(2): 207-304.
- Jatsun, S. F., Saveleva, E. V., & Politov, E. N. 2024. Motion Dynamics of a Three-Wheeled Transmission Cargo Platform in Special Modes. *International Journal of Open Information Technologies*, 12(4): 37-45.
- Jaulin, L. 2019. *Mobile Robotics*. Wiley, Hoboken, NJ, 363 p.
- Karur, K., Sharma, N., Dharmatti, C. and Siegel, J.E. 2021. A Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots. *Vehicles*, 3(3): 448-468.
- Kašík, V. and Pokorný, M. 2000. Microprocessor Based Mobile Robot Control System. *IFAC Proceedings Volumes*, 33(27): 381-384.
- Kaur, B. et al. 2023. Insights into the harvesting tools and equipment for horticultural crops: from then to now. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14: 100814.
- Khraisat, Y.S., Al-Khateeb, M., Abu-Alreesh, Y., Ayyash, A. and Lahlouh, O. 2011. GPS Navigation and Tracking Device. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 5(4): 39-41.
- King, A. 2017. Technology: The Future of Agriculture. *Nature*, 544(7651): S21-S23.
- Korendiy, V., Kachur, O. and Predko, R. 2023. Development of a Remote-Control System for a Mobile Vibration-Driven Robot. In: *Proceedings of the 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2023)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 6-10.
- Kragh, M. and Underwood, J. 2020. Multimodal obstacle detection in unstructured environments with conditional random fields. *Journal of Field Robotics*, 37: 53–72.
- Kvamme, K.L. 1999. Recent Directions and Developments in Geographical Information Systems.
- Lei, X. et al. 2023. Technologies and Equipment of Mechanized Blossom Thinning in Orchards: A Review. *Agronomy*, 13: 2753.
- Lewandowicz, E., Lisowski, P. and Flisek, P. 2019. A Modified Methodology for Generating Indoor Navigation Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2): 60.
- Li, P., Liu, J., Zhang, W. and Liu, X. 2019. Summary on sensors in agricultural robots. In: *Proceedings of SPIE*, Vol. 11321, pp. 702-709.

- Li, X., Zhang, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J. and Schuh, H. 2015. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Scientific Reports*, 5: 8328.
- Liao, J., Chen, Z. and Yao, B. 2019. Model-Based Coordinated Control of Four-Wheel Independently Driven Skid Steer Mobile Robot with Wheel-Ground Interaction and Wheel Dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3): 1742-1752.
- Liu, C. and Yu, X. 2022. Construction of 3D Design Model of Urban Public Space Based on ArcGIS Water System Terrain Visualization Data. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022: 1881342.
- Luft, J. and Schiewe, J. 2021. Automatic content-based georeferencing of historical topographic maps. *Transactions in GIS*, 25(6): 2888-2906.
- Ma, Y., Zheng, G. and Perruquetti, W. 2013. Real-time Identification of Different Types of Non-Holonomic Mobile Robots. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(23): 791-796.
- Marosan, I.-A. and Constantin, G. 2021. Design of a Modular Locomotion System for Autonomous Mobile Robots. *MATEC Web of Conferences*, 343: 08006.
- Michael, B.C.W. 2003. NMEA 0183 Sentence Transporter over Ethernet. <https://typeset.io/papers/nmea-0183-sentence-transporter-over-ethernet-4guyv6mo2v> [Son erişim tarihi: 26 Mayıs 2024].
- Miki, T. et al. 2022. Learning robust perceptive locomotion for quadrupedal robots in the wild. *Science Robotics*, 7.
- Moreno, J. et al. 2016. Design, implementation and validation of the three-wheel holonomic motion system of the assistant personal robot (APR). *Sensors*, 16(10): 1658.
- Milleville, K., Verstockt, S. and De Weghe, N. 2022. Automatic Georeferencing of Topographic Raster Maps. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11: 387.
- Nagasaka, Y., Umeda, N., Kanetai, Y., Taniwaki, K. and Sasaki, Y. 2004. Autonomous guidance for rice transplanting using global positioning and gyroscopes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43: 223–234.
- Nissen, F., Hvas, A., Swendsen, J. and Brodersen, L. 2003. Small-Display Cartography. *GiMoDig Scientific Report*.
- Ng, C.S.X., Tan, M.W.M., Xu, C., Yang, Z., Lee, P.S. and Lum, G.Z. 2021. Locomotion of Miniature Soft Robots. *Advanced Materials*, 33(19): 2003558.
- Parush, A. 2015. Conceptual Design: An Overview of the Methodology. In: *Conceptual Design for Interactive Systems*, pp. 77-78.
- Paton, M., Pomerleau, F., MacTavish, K., Ostafew, C.J. and Barfoot, T.D. 2017. Expanding the Limits of Vision-based Localization for Long-term Route-following Autonomy. *Journal of Field Robotics*, 34: 98–122.
- Peña, C., Riaño, C. and Moreno, G. 2018. RobotGreen. A teleoperated agricultural robot for structured environments. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 11(6): 144-155.

- Qin, J. et al. 2022. Research on a Map-Based Cooperative Navigation System for Spraying-Dosing Robot Group. *Agronomy*, 12: 3114.
- Perrier, C. and Dauchez, P. 1998. A Global Approach for Motion Generation of Non-Holonomic Mobile Manipulators.
- Radicioni, F., Stoppini, A., Marconi, L. and Tosi, G. 2023. Low-cost Multi-frequency GNSS Receivers: Performance Evaluation for Positioning and Navigation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48(1/W3-2023): 167-174.
- Ramin Shamshiri, R. et al. 2018. Research and Development in Agricultural Robotics: A Perspective of Digital Farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4): 1-11.
- Ravendran, A. and Hsu, C.-H. 2019. Low Cost Collision Avoidance System on Holonomic and Non-Holonomic Mobile Robots. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 5(1): 12-22.
- Rezapour, E., Pettersen, K.Y., Liljebäck, P., Gravdahl, J.T. and Kelasidi, E. 2014. Path Following Control of Planar Snake Robots Using Virtual Holonomic Constraints: Theory and Experiments. *Journal of Robotics and Biomimetics*, 1(1): 3.
- Richert, T. and El-Sheimy, N. 2007. Optimal Linear Combinations of Triple Frequency Carrier Phase Data from Future Global Navigation Satellite Systems. *GPS Solutions*, 11(1): 11-19.
- Russo, M. and Ceccarelli, M. 2020. A Survey on Mechanical Solutions for Hybrid Mobile Robots. *Robotics*, 9(2): 32.
- Shamshiri, R. R. et al. 2018. Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(4): 1–11.
- Sharp, I. and Yu, K. 2012. Positional accuracy measurement and error modeling for mobile tracking. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 11(7): 1021–1032.
- Shi, X., Kindratenko, V. and Yang, C. 2013. Modern Accelerator Technologies for Geographic Information Science. In: *Modern Accelerator Technologies for Geographic Information Science*, pp. 3-6.
- Siddall, R.J.D. 2018. Aerial Aquatic Locomotion with Miniature Robots.
- Singh, H. and Bawa, S. 2016. Spatial data analysis with ArcGIS and MapReduce. In: *Proceedings of the 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, Greater Noida, India, pp. 45-49.
- Şişman, Y. and Şişman, A. 2017. The Factors Optimization on Georeferencing Analogue Maps. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42(6): 2471-2478.
- Srećko, K., Kezić, D. and Dimc, F. 2013. NMEA Communication Standard for Shipboard Data Architecture, 60: 68-81.
- Stateczny, A., Błaszczak-Bak, W., Sobieraj-Złobińska, A., Motyl, W. and Wiśniewska, M. 2019. Methodology for Processing of 3D Multibeam Sonar Big Data for Comparative Navigation. *Remote Sensing*, 11(19): 2245.

- Stombaugh, T.S., Benson, E.R. and Hummel, J.W. 1999. Guidance Control of Agricultural Vehicles at High Field Speeds. *Transactions of the ASAE*, 42(2): 537–544.
- Strisciuglio, N. et al. 2018. TrimBot2020: An Outdoor Robot for Automatic Gardening.
- Tao, B., Zhao, X., Yan, S. and Ding, H. 2022. Kinematic Modeling and Control of Mobile Robot for Large-Scale Workpiece Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(1-2): 29-38.
- Tateosian, L. 2015. ArcGIS and Python. In: *Python for ArcGIS*. Springer, Cham, pp. 77-94.
- Tomaszewski, B. 2020. Geographic Information Systems. In: *Geographic Information Systems (GIS) for Disaster Management*, pp. 93-152.
- Tsiakas, K., Papadimitriou, A., Pechlivani, E.M., Giakoumis, D., Frangakis, N., Gasteratos, A. and Tzovaras, D. 2023. An Autonomous Navigation Framework for Holonomic Mobile Robots in Confined Agricultural Environments. *Robotics*, 12(6): 146.
- Turner, D., Lucieer, A. and Wallace, L. 2014. Direct Georeferencing of Ultrahigh-Resolution UAV Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5): 2738–2745.
- Uddin, N., Nugraha, H., Manurung, A., Hermawan, H. and Darajat, T.M. 2022. Kinematics Modeling and Motions Analysis of Non-Holonomic Mobile Robot. In: *Proceedings of the 2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, pp. 220-225.
- Underwood, J.P., Calleija, M., Taylor, Z., Hung, C., Nieto, J., Fitch, R. and Sukkarieh, S. 2015. Real-Time Target Detection and Steerable Spray for Vegetable Crops.
- Underwood, J.P. et al. 2015. Real-time target detection and steerable spray for vegetable crops. In: *Proceedings of the Workshop on Robotics in Agriculture at the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*.
- Usmani, R.S.A. et al. 2020. Geographic Information System and Big Spatial Data: A Review and Challenges. *International Journal of Enterprise Information Systems*, 16(4): 101-145.
- Ünal, İ. 2012. GPS yönlendirmeli tarımsal bir robotun geliştirilmesi ve anız yoğunluğunun belirlenmesi örneğinde kullanımı üzerine bir araştırma. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 208 s.
- Ünal, İ. and Topakci, M. 2015. Design of a Remote-controlled and GPS-guided Autonomous Robot for Precision Farming. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12: 1–10.
- Varlamis, I., Kontopoulos, I., Tserpes, K., Etemad, M., Soares, A. and Matwin, S. 2021. Building Navigation Networks from Multi-Vessel Trajectory Data. *GeoInformatica*, 25(1): 69-97.
- Verbiest, R., Ruysen, K., Vanwalleghem, T., Demeester, E. and Kellens, K. 2021. Automation and robotics in the cultivation of pome fruit: Where do we stand

- today? *Journal of Field Robotics*, 38: 513–531.
- Wada, M., Tominaga, Y. and Mori, S. [tarih yok]. Omnidirectional Holonomic Mobile Robot Using Nonholonomic Wheels.
- Wang, L. and Li, S. 2018. Enhanced Multi-Sensor Data Fusion Methodology Based on Multiple Model Estimation for Integrated Navigation System. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16(1): 295-305.
- Xiao, B. and Zhang, K. 2002. Handheld GPS and Mobile Mapping. *Cartography*, 31(1): 99-108.
- Zhang, D., Guo, C., Ren, H., Zhu, P., Xu, M. and Lu, H. 2021. The Design of an Aerial/Ground Dual-Modal Mobile Robot for Exploring Complex Environments. In: *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics (RCAR 2021)*, pp. 393-398.
- Zhang, F., Wang, J., Thon, J., Thon, C., Litchman, E. and Tan, X. 2014. Gliding Robotic Fish for Mobile Sampling of Aquatic Environments. In: *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2014)*, pp. 167-172.
- Zhang, G., Zhang, G., Ma, S., Shen, Y., Shen, Y. and Li, Y. 2020. A Motion Planning Approach for Nonprehensile Manipulation and Locomotion Tasks of a Legged Robot. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(3): 855-874.
- Zogg, J.M. 2002. *GPS Basics – Introduction to the System Application Overview*. U-Blox AG, Switzerland, 94 p.

7. EKLER

EK-1. Geliştirilen yazılımına ait kodlar

Imports System

Imports System.Threading

Imports System.IO.Ports

Imports System.ComponentModel

Imports System.Data.SqlClient

Imports System.Data.OleDb

Imports Microsoft.DirectX.DirectInput

Public Class Form1

Dim baglan As New OleDbConnection("Provider=Microsoft.Jet.Oledb.4.0;Data Source=" + Application.StartupPath + "\drill.mdb")

Dim adap As New OleDbDataAdapter("Select sir,utmx,utmy from nav1_file", baglan)

Dim komut As New OleDbCommand

Dim ds As New DataSet

Dim gelen As String

Dim heading, hız As Double

Dim azimuth As Double

Dim utmx, utmy As Double

Dim hedefx, hedefy As Double

Dim aracquadrant As Byte

Dim hedefquadrant As Byte

Dim azimuthx As Double

Dim acıfarkı As Double

Dim hedefmesafe As Double

Dim kayıt As Boolean = False

Const A = 6378137

Dim PI As Double = 3.1415927

Const k0 = 0.9996

Const e = 0.081819190842

Const eccSquared = 0.00669437999

Const eccPrimeSquared = 0.006739496742

Const North_South_Offset = 10000000

Const East_West_Offset = 500000

Dim Deg_Long As Double

Dim Min_Long As Double

Dim Sec_Long As Double

Dim Deg_Lat As Double

Dim Min_Lat As Double

Dim Sec_Lat As Double

Dim DirEW

Public DirNS

Dim Zone_Number

Dim X_North_south

Dim Y_East_West

Dim b, f, deg_RAD, longrad, FormuleLong, FormuleLat, FormuleNS As Double

Dim longi, longo, lat, longdeg_origin, longradorigin As Double

Dim sinlat, sin2lat, coslat, tanlat, n1, n2, n3, n4, n5, T, C, A0 As Double

Dim Aprime, Bprime, Cprime, Dprime, Eprime, M, N As Double

'Dim durum As JoystickState

'Dim joystickdevice As Device

'Dim cps As DeviceCaps

```
'Dim xx As DeviceList
```

```
'Dim buton() As Byte
```

```
Private Sub btn_find_distance_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_find_distance.Click 'Mesafe Bul
```

```
    txt_distance.Text = Math.Sqrt((txt_page2_utmz.Text - txt_target_utmz.Text) ^ 2 +  
(txt_page2_utmz.Text - txt_target_utmz.Text) ^ 2)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_find_azimuth_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_find_azimuth.Click
```

```
    azimuthx = Math.Atan2((txt_target_utmz.Text - txt_page2_utmz.Text),  
(txt_target_utmz.Text - txt_page2_utmz.Text)) * (180 / Math.PI)
```

```
    If azimuthx < 0 Then
```

```
        azimuth = 360 + azimuthx
```

```
    Else
```

```
        azimuth = azimuthx
```

```
    End If
```

```
    txt_page2_azimuth.Text = azimuth
```

```
    acıfarkı = azimuth - heading
```

```
    txt_farkı.Text = acıfarkı
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_find_aq_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_find_aq.Click
```

```
    If heading >= 0 And heading < 90 Then
```

```
        TextBox10.Text = 1
```

```
        aracquadrant = 1
```

```
    ElseIf heading >= 90 And heading < 180 Then
```

```
        TextBox10.Text = 2
```

```
        aracquadrant = 2
```

```
ElseIf heading >= 180 And heading < 270 Then
    TextBox10.Text = 3
    aracquadrant = 3
ElseIf (heading >= 270 And heading < 360) Then
    TextBox10.Text = 4
    aracquadrant = 4
Else
    TextBox10.Text = 5
    aracquadrant = 5
End If
txt_aq.Text = aracquadrant
End Sub

Private Sub btn_find_hq_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
    btn_find_hq.Click
    If azimuth >= 0 And azimuth < 90 Then
        TextBox11.Text = 1
        hedefquadrant = 1
    ElseIf azimuth >= 90 And azimuth < 180 Then
        TextBox11.Text = 2
        hedefquadrant = 2
    ElseIf azimuth >= 180 And azimuth < 270 Then
        TextBox11.Text = 3
        hedefquadrant = 3
    ElseIf azimuth >= 270 And azimuth < 360 Then
        TextBox11.Text = 4
        hedefquadrant = 4
    End If
End Sub
```

```

Else

    TextBox11.Text = 5

    hedefquadrant = 5

End If

txt_hq.Text = hedefquadrant

End Sub

Private Sub btn_turn_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_turn.Click

    Deneme.Enabled = True

End Sub

Private Sub Deneme_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles Deneme.Tick

    azimuthx = Math.Atan2((txt_target_utmmy.Text - txt_page2_utmmy.Text),
(txt_target_utmmy.Text - txt_page2_utmmy.Text)) * (180 / Math.PI)

    If azimuthx < 0 Then

        azimuth = 360 + azimuthx

    Else

        azimuth = azimuthx

    End If

    txt_page2_azimuth.Text = azimuth

    acıfark1 = azimuth - heading

    txt_fark.Text = acıfark1

    If (aracquadrant = 1 And hedefquadrant = 2) Or (aracquadrant = 1 And
hedefquadrant = 3) Or (aracquadrant = 2 And hedefquadrant = 3) Or (aracquadrant = 2
And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 3 And hedefquadrant = 1) Or (aracquadrant
= 3 And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 4 And hedefquadrant = 1) Or
(aracquadrant = 4 And hedefquadrant = 2) Then

        Motor_Port.Write("!M -800 800" & vbCr)

        Me.Text = "SAĞ"

        If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 0.2 Then

```

```
Deneme.Enabled = False

End If

ElseIf (aracquadrant = 1 And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 2 And
hedefquadrant = 1) Or (aracquadrant = 3 And hedefquadrant = 2) Or (aracquadrant = 4
And hedefquadrant = 3) Then

    Me.Text = "SOL"

    Motor_Port.Write("!M 800 -800" & vbCr)

    If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 0.2 Then

        Deneme.Enabled = False

    End If

Else

    If (heading > azimuth) Then

        Motor_Port.Write("!M 800 -800" & vbCr)

        If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 0.2 Then

            Deneme.Enabled = False

        End If

    ElseIf (heading < azimuth) Then

        Motor_Port.Write("!M -800 800" & vbCr)

        If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 0.2 Then

            Deneme.Enabled = False

        End If

    Else

        Deneme.Enabled = False

    End If

End If

End Sub
```

```
Private Sub btn_control_stop_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_control_stop.Click
```

```
Deneme.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub txt_fark_TextChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
txt_fark.TextChanged
```

```
TextBox6.Text = txt_fark.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_manuel_go_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_manuel_go.Click
```

```
KONTROL_2.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_manuel_stop_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_manuel_stop.Click
```

```
KONTROL_2.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub left_motor_ValueChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
left_motor.ValueChanged
```

```
right_motor.Value = left_motor.Value
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_drill_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_drill.Click
```

```
Timer_Drill.Enabled = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_drill_stop_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_drill_stop.Click
```

```
Timer_Drill.Enabled = False
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer_Drill_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
Timer_Drill.Tick
```

```
Motor_Port.Write("!M 0 0 " & drill_motor.Value & vbCrLf)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_add_plot_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_add_plot.Click
```

```
Try
```

```
komut.Connection = baglan
```

```
komut.CommandText = "Insert into nav1_file(sira,utmx,utmy) values(" & utmx  
& "," & utmy & "," & nup_sira.Value & ")"
```

```
baglan.Open()
```

```
komut.ExecuteNonQuery()
```

```
baglan.Close()
```

```
Catch
```

```
baglan.Close()
```

```
End Try
```

```
End Sub
```

```
Private Sub btn_del_plot_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
btn_del_plot.Click
```

```
Try
```

```
komut.Connection = baglan
```

```
komut.CommandText = "Delete * from nav1_file Where sira=" &  
nup_sira.Value
```

```
baglan.Open()
```

```
komut.ExecuteNonQuery()
```

```
baglan.Close()
```

```
Catch
```

```
baglan.Close()
```

```
End Try

Call dosya_yukle()

End Sub

Private Sub Form1_Load(sender As Object, e As EventArgs) Handles MyBase.Load

    'Try

    ' xx = Manager.GetDevices(DeviceClass.GameControl,
EnumDevicesFlags.AttachedOnly)

    ' If (xx.Count > 0) Then

    '     Dim systemJoysticks(xx.Count) As String

    '     Dim i As Integer = 0

    '     For Each deviceinstance As DeviceInstance In xx

    '         joystickdevice = New Device(deviceinstance.InstanceGuid)

    '         joystickdevice.SetCooperativeLevel(Me,
CooperativeLevelFlags.Background + CooperativeLevelFlags.NonExclusive)

    '         systemJoysticks(i) = joystickdevice.DeviceInformation.InstanceName

    '         i = i + 1

    '     Next

    '     joystickdevice.SetDataFormat(DeviceDataFormat.Joystick)

    '     joystickdevice.Acquire()

    ' End If

    'Catch

    'End Try

End Sub

Private Sub joystickzaman_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles
joystickzaman.Tick

    'Try

    ' cps = joystickdevice.Caps
```

```
' joystickdevice.Poll()
' durum = joystickdevice.CurrentJoystickState
' Dim deadZone As Double
' deadZone = 4096
' Dim vX As Double, vY As Double

' vX = durum.X - 32767
' If (vX < deadZone) And (vX > -deadZone) Then 'if in the dead zone
'     vX = 0
' Else
'     vX = vX - Math.Sign(vX) * deadZone
' End If

' vY = durum.Y - 32767
' If (vY < deadZone) And (vY > -deadZone) Then 'if in the dead zone
'     vY = 0
' Else
'     vY = vY - Math.Sign(vY) * deadZone
' End If

' txtjoyx.Text = vX
' txtjoyy.Text = vY
' 'ileri
' If vY >= -4096 And vY <= 0 Then
'     Motor_Port.Write("!M 0 0" & vbCr)
' ElseIf vY < -4096 And vY >= -8192 Then
'     Motor_Port.Write("!M 200 200" & vbCr)
```

```
' ElseIf vY < -8192 And vY >= -12288 Then
'     Motor_Port.Write("!M 300 500" & vbCr)
' ElseIf vY < -12288 And vY >= -16384 Then
'     Motor_Port.Write("!M 500 500" & vbCr)
' ElseIf vY < -16384 And vY >= -20480 Then
'     Motor_Port.Write("!M 600 600" & vbCr)
' ElseIf vY < -20480 Then
'     Motor_Port.Write("!M 700 700" & vbCr)
' End If
' 'geri
' If vY <= 4096 And vY >= 0 Then
'     Motor_Port.Write("!M 0 0" & vbCr)
' ElseIf vY > 4096 And vY <= 8192 Then
'     Motor_Port.Write("!M -200 -200" & vbCr)
' ElseIf vY > 8192 And vY <= 12288 Then
'     Motor_Port.Write("!M -300 -300" & vbCr)
' ElseIf vY > 12288 And vY <= 16384 Then
'     Motor_Port.Write("!M -500 -500" & vbCr)
' ElseIf vY > 16384 And vY <= 20480 Then
'     Motor_Port.Write("!M -600 -600" & vbCr)
' ElseIf vY > 20480 Then
'     Motor_Port.Write("!M -700 -700" & vbCr)
' End If
' 'sağ sol
' If vX > 10000 And vX < 29000 Then
'     Motor_Port.Write("!M 1000 250" & vbCr)
```

```
' ElseIf vX < -10000 And vX < 0 Then
'     Motor_Port.Write("!M 250 1000" & vbCr)
' Else
'     'Motor_Port.Write("!M 0 0" & vbCr)
' End If

' Dim motormod As Byte
' buton = durum.GetButtons
' Dim j As Integer
' For j = 0 To 10
'     If buton(j) >= 128 Then
'         lstjoybutton.Items.Clear()
'         lstjoybutton.Items.Add(j + 1)
'     End If
' Next
' motormod = lstjoybutton.Items.Item(0)
' Me.Text = motormod
' If motormod = 1 Then
'     Motor_Port.Write("!M 0 0 0" & vbCr)
' End If

'Catch

'End Try

End Sub

Private Sub btnjoystick_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btnjoystick.Click

'Dim joycevap As DialogResult

'joycevap = MessageBox.Show("Do you want manuel drive?", "Control",
MessageBoxButtons.YesNo)
```

```
'If joycevap = DialogResult.Yes Then
```

```
' joystickzaman.Enabled = True
```

```
' Motor_Port.Open()
```

```
'Else
```

```
' joystickzaman.Enabled = False
```

```
' Motor_Port.Close()
```

```
'End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub hedef_liste_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
hedef_liste.Click
```

```
Dim satir As Integer
```

```
satir = hedef_liste.CurrentRow.Number
```

```
txt_target_utmy.Text = hedef_liste(satir, 1)
```

```
txt_target_utmX.Text = hedef_liste(satir, 2)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub txt_heading_TextChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
txt_heading.TextChanged
```

```
txt_page2_heading.Text = txt_heading.Text
```

```
heading = txt_heading.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub txt_utmY_TextChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
txt_utmY.TextChanged
```

```
txt_page2_utmy.Text = txt_utmY.Text
```

```
End Sub
```

```
Private Sub txt_utmX_TextChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
txt_utmX.TextChanged
```

```
txt_page2_utmX.Text = txt_utmX.Text
```

```
End Sub
```

```
Delegate Sub SetTextCallback(ByVal [text] As String)

Delegate Sub SetTextCallback1(ByVal [textgps] As String)

Private Sub btn_load_waypoints_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_load_waypoints.Click

    Call dosya_yukle()

End Sub

Public Sub dosya_yukle()

    ds.Clear()

    adap.Fill(ds, "nav_file")

    hedef_liste.DataSource = ds.Tables("nav_file")

End Sub

Public Sub sonraki_nokta()

    lbl_sira.Text = lbl_sira.Text + 1

End Sub

Dim hedefvarmı As Boolean = False

Public Sub hedef_al()

    Try

        hedefvarmı = False

        komut.Connection = baglan

        komut.CommandText = "select utmx, utmy from nav1_file where sira=" &
lbl_sira.Text

        Dim dr As OleDbDataReader

        baglan.Open()

        dr = komut.ExecuteReader

        Do While dr.Read = True

            hedefvarmı = True

            hedefx = dr(0)
```

```
hedefy = dr(1)
```

```
Loop
```

```
baglan.Close()
```

```
If hedefvarmı = False Then
```

```
    KONTROL_1.Enabled = False
```

```
    KONTROL_2.Enabled = False
```

```
    KONTROL_3.Enabled = False
```

```
    KONTROL_4.Enabled = False
```

```
    lbl_sira.Text = "0"
```

```
End If
```

```
Catch
```

```
    baglan.Close()
```

```
End Try
```

```
End Sub
```

```
Public Sub ConvUTM3(ByVal DirEW, ByVal DirNS, ByVal Deg_Long, ByVal  
Min_Long, ByVal Sec_Long, ByVal Deg_Lat, ByVal Min_Lat, ByVal Sec_Lat)
```

```
    b = A - A / 298.2572
```

```
    deg_RAD = (2 * PI) / 360
```

```
    FormuleLong = ((Deg_Long) + (Min_Long) / 60 + (Sec_Long) / 3600) *  
deg_RAD
```

```
    FormuleLat = ((Deg_Lat) + ((Min_Lat) / 60) + ((Sec_Lat) / 3600)) * deg_RAD
```

```
    If DirEW = "E" Then
```

```
        longi = FormuleLong
```

```
    Else
```

```
        longi = -1 * FormuleLong
```

```
    End If
```

```
    If DirNS = "N" Then
```

```
lat = FormuleLat
Else
    lat = -1 * FormuleLat
End If
If Deg_Long = 180 Then
    Zone_Number = 1
Else
    If DirEW = "E" Then
        Zone_Number = Int((Deg_Long / 6) + 31)
    Else
        Zone_Number = Math.Abs(Int((Deg_Long) / 6) - 30)
    End If
End If
longdeg_origin = ((Zone_Number - 1) * 6) - 180 + 3
longo = (longdeg_origin) * deg_RAD
sinlat = Math.Sin(lat)
sin2lat = Math.Sin(lat) * Math.Sin(lat)
coslat = Math.Cos(lat)
tanlat = Math.Tan(lat)
T = Math.Tan(lat)
N = A / Math.Sqrt(1 - eccSquared * sin2lat)
C = eccPrimeSquared * coslat * coslat
A0 = coslat * (longi - longo)
n1 = (A - b) / (A + b)
n2 = n1 * n1
n3 = n2 * n1
```

$$n4 = n3 * n1$$

$$n5 = n4 * n1$$

$$A_{\text{prime}} = A * (1 - n1 + (5 / 4) * (n2 - n3) + (81 / 64) * (n4 - n5))$$

$$B_{\text{prime}} = (3 * A * n1 / 2) * (1 - n1 + (7 / 8) * (n2 - n3) + (55 / 64) * (n4 - n5))$$

$$C_{\text{prime}} = (15 * A * n2 / 16) * (1 - n1 + (3 / 4) * (n2 - n3))$$

$$D_{\text{prime}} = (35 * A * n3 / 48) * (1 - n1 + (11 / 16) * (n2 - n3))$$

$$E_{\text{prime}} = (315 * A * n4 / 51) * (99 / 144) * (n2 - n3)$$

$$M = A_{\text{prime}} * \text{lat} - B_{\text{prime}} * \text{Math.Sin}(2 * \text{lat}) + C_{\text{prime}} * \text{Math.Sin}(4 * \text{lat}) - D_{\text{prime}} * \text{Math.Sin}(6 * \text{lat}) + E_{\text{prime}} * \text{Math.Sin}(8 * \text{lat})$$

$$\text{FormuleNS} = (k0 * (M + N * \tan \text{lat} * (A0 * A0 / 2 + (5 - T + 9 * C + 4 * C * C) * A0 * A0 * A0 * A0 / 24 + (61 - 58 * T + T * T + 600 * C - 330 * \text{eccPrimeSquared}) * A0 * A0 * A0 * A0 * A0 * A0 / 720)))$$

If lat < 0 Then

$$X_{\text{North_south}} = \text{North_South_Offset} + \text{FormuleNS}$$

Else

$$X_{\text{North_south}} = \text{FormuleNS}$$

End If

$$Y_{\text{East_West}} = (k0 * N * (A0 + (1 - T + C) * A0 * A0 * A0 / 6 + (5 - 18 * T + T * T + 72 * C - 58 * \text{eccPrimeSquared}) * A0 * A0 * A0 * A0 * A0 / 120) + \text{East_West_Offset})$$

End Sub

Public Sub aracquadrantbul()

If heading >= 0 And heading < 90 Then

$$\text{aracquadrant} = 1$$

ElseIf heading >= 90 And heading < 180 Then

$$\text{aracquadrant} = 2$$

ElseIf heading >= 180 And heading < 270 Then

$$\text{aracquadrant} = 3$$

```
ElseIf (heading >= 270 And heading < 360) Then
    aracquadrant = 4
Else
    aracquadrant = 5
End If
End Sub

Public Sub azimuth_hesapla()
    azimuthx = Math.Atan2((hedefx - utmx), (hedefy - utmy)) * (180 / Math.PI)
    If azimuthx < 0 Then
        azimuth = 360 + azimuthx
    Else
        azimuth = azimuthx
    End If
    txt_azimuth.Text = azimuth
    acıfark1 = azimuth - heading
    txt_fark.Text = acıfark1
End Sub

Public Sub hedefquadrantbul()
    If azimuth >= 0 And azimuth < 90 Then
        hedefquadrant = 1
    ElseIf azimuth >= 90 And azimuth < 180 Then
        hedefquadrant = 2
    ElseIf azimuth >= 180 And azimuth < 270 Then
        hedefquadrant = 3
    ElseIf azimuth >= 270 And azimuth < 360 Then
        hedefquadrant = 4
    End If
End Sub
```

Else

hedefquadrant = 5

End If

End Sub

Public Sub mesafebul()

hedefmesafe = Math.Sqrt((utm_x - hedef_x) ^ 2 + (utm_y - hedef_y) ^ 2)

txt_mesafe.Text = hedefmesafe

End Sub

Public Sub hareketbelirle()

If (aracquadrant = 1 And hedefquadrant = 2) Or (aracquadrant = 1 And hedefquadrant = 3) Or (aracquadrant = 2 And hedefquadrant = 3) Or (aracquadrant = 2 And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 3 And hedefquadrant = 1) Or (aracquadrant = 3 And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 4 And hedefquadrant = 1) Or (aracquadrant = 4 And hedefquadrant = 2) Then

KONTROL_1.Enabled = False ' ana stop

KONTROL_4.Enabled = True ' saga_dön start

ElseIf (aracquadrant = 1 And hedefquadrant = 4) Or (aracquadrant = 2 And hedefquadrant = 1) Or (aracquadrant = 3 And hedefquadrant = 2) Or (aracquadrant = 4 And hedefquadrant = 3) Then

KONTROL_1.Enabled = False ' ana stop

KONTROL_3.Enabled = True ' sola_don start

Else

If (heading > azimuth) Then

KONTROL_1.Enabled = False ' ana stop

KONTROL_3.Enabled = True ' sola_don start

ElseIf (heading < azimuth) Then

KONTROL_1.Enabled = False ' ana stop

KONTROL_4.Enabled = True ' saga_dön start

Else

```
KONTROL_1.Enabled = False
```

```
KONTROL_2.Enabled = True
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Compass_Port_DataReceived(sender As Object, e As  
SerialDataReceivedEventArgs) Handles Compass_Port.DataReceived
```

```
    ReceivedText(Compass_Port.ReadLine)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub ReceivedText(ByVal [text] As String)
```

```
    Try
```

```
        If Me.txt_heading.InvokeRequired Then
```

```
            Dim x As New SetTextCallback(AddressOf ReceivedText)
```

```
            Me.Invoke(x, New Object() {(text)})
```

```
        Else
```

```
            Dim ayr() As String
```

```
            ayr = [text].Split(",")
```

```
            If ayr(0) = "$HCHDT" Then
```

```
                heading = ayr(1)
```

```
                txt_heading.Text = heading
```

```
            End If
```

```
        End If
```

```
    Catch
```

```
    End Try
```

```
End Sub
```

Private Sub btn_start_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_start.Click

Compass_Port.Open()

GPS_Port.Open()

'GPS_Port.WriteLine("\$PASHS,NME,RMC,M,ON,1")

Motor_Port.Open()

End Sub

Private Sub btn_stop_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_stop.Click

Compass_Port.Close()

GPS_Port.Close()

Motor_Port.Close()

End Sub

Private Sub GPS_Port_DataReceived(sender As Object, e As
SerialDataReceivedEventArgs) Handles GPS_Port.DataReceived

Try

ReceivedTextgps(GPS_Port.ReadLine)

Catch ex As Exception

End Try

End Sub

Private Sub ReceivedTextgps(ByVal [textgps] As String)

Try

If Me.txt_utmX.InvokeRequired Then

Dim y As New SetTextCallback1(AddressOf ReceivedTextgps)

Me.Invoke(y, New Object() {(textgps)})

Else

Dim ayrık() As String

```
ayrik = [textgps].Split(",")
If ayrik(0) = "$GPRMC" Then
    Deg_Long = Convert.ToDouble(Mid(ayrik(5), 1, 3))
    Min_Long = Convert.ToDouble(Mid(ayrik(5), 4, 2))
    Sec_Long = Convert.ToDouble("0." & Mid(ayrik(5), 7, 6)) * 60
    Deg_Lat = Convert.ToDouble(Mid(ayrik(3), 1, 2))
    Min_Lat = Convert.ToDouble(Mid(ayrik(3), 3, 2))
    Sec_Lat = Convert.ToDouble("0." & Mid(ayrik(3), 6, 6)) * 60
    DirEW = "E"
    DirNS = "N"
    Call ConvUTM3(DirEW, DirNS, Deg_Long, Min_Long, Sec_Long,
Deg_Lat, Min_Lat, Sec_Lat)
    utmy = Convert.ToDouble(X_North_south)
    utmx = Convert.ToDouble(Y_East_West)
    h1z = Convert.ToDouble(ayrik(7)) * 1.852
    txt_utmX.Text = utmx
    txt_utmY.Text = utmy
    txt_h1z.Text = h1z
End If
End If
Catch
End Try
End Sub

Private Sub cb_save_CheckedChanged(sender As Object, e As EventArgs) Handles
cb_save.CheckedChanged
    If cb_save.Checked = True Then
        GPS_Zaman.Enabled = True
    End If
End Sub
```

```
Else

    GPS_Zaman.Enabled = False

End If

End Sub

Private Sub GPS_Zaman_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles
GPS_Zaman.Tick

    Try

        komut.Connection = baglan

        komut.CommandText = "Insert into status(utm,utmy,speed) values(" & utmx &
        "," & utmy & "," & hız & ")"

        baglan.Open()

        komut.ExecuteNonQuery()

        baglan.Close()

    Catch

        baglan.Close()

    End Try

End Sub

Private Sub btn_start_navigation_Click(sender As Object, e As EventArgs) Handles
btn_start_navigation.Click

    KONTROL_1.Enabled = True

End Sub

Private Sub KONTROL_1_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles
KONTROL_1.Tick

    Call sonraki_nokta()

    hedef_liste.Select(lbl_sira.Text)

    'Call hedef_al()

    'Call mesafebul()

    'Call azimuth_hesapla()
```

```
'Call aracquadrantbul()
```

```
'Call hedefquadrantbul()
```

```
'Call hareketbelirle()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub KONTROL_2_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
KONTROL_2.Tick
```

```
'Call mesafebul()
```

```
Motor_Port.Write("!M " & left_motor.Value & " " & right_motor.Value & vbCr)
```

```
'If hedefmesafe >= 0 And hedefmesafe <= 1 Then
```

```
' KONTROL_2.Enabled = False
```

```
' KONTROL_1.Enabled = True
```

```
'End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub KONTROL_3_Tick_1(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
KONTROL_3.Tick
```

```
'Call azimuth_hesapla()
```

```
Motor_Port.Write("!M -300 300" & vbCr)
```

```
'If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 1 Then
```

```
' KONTROL_3.Enabled = False
```

```
' KONTROL_2.Enabled = True
```

```
'End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub KONTROL_4_Tick(sender As Object, e As EventArgs) Handles  
KONTROL_4.Tick
```

```
'Call azimuth_hesapla()
```

```
Motor_Port.Write("!M 300 -300" & vbCr)
```

```
'If acıfark1 >= 0 And acıfark1 <= 1 Then
```

```
' KONTROL_4.Enabled = False  
' KONTROL_2.Enabled = True  
End If  
End Sub  
End Class
```



ÖZGEÇMİŞ

OSMAN ECEOĞLU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora 2019-2024	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2017-2019	Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzaktan Algılama ve CBS Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans 2011-2013	Akdeniz Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İşletme Bölümü, Antalya
Lisans 2004-2009	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Bölüm Başkan Yardımcısı 2019-2024	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya
Program Koordinatörü 2018-2019	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya
Öğretim Görevlisi 2017- Devam Ediyor	Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Antalya

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Eceoğlu, O., Ünal, İ., (2024). Optimizing Orchard Planting Efficiency with a GIS-Integrated Autonomous Soil-Drilling Robot. AgriEngineering , 6(15), 2870-2890. Doi: 10.3390/agriengineering6030166
- 2- Ünal İ., Kabaş Ö., Eceoğlu O., Moiceanu G., (2023). Adaptive Multi-Robot Communication System and Collision Avoidance Algorithm for Precision Agriculture. Applied Sciences, 13(15),8602. Doi:10.3390/app13158602
- 3- Ünal İ., Kabaş Ö., Eceoğlu O., (2023). Development of angular correction algorithm for movement of agricultural mobile robots in a straight line. Control Engineering and Applied Informatics, 25(3), 15-22. Doi: 10.61416/ceai.v25i3.8326

